

МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ И ФОРМИРОВАНИЕ АККУМУЛЯЦИОННОГО СЛОЯ УЛЬТРАТОНКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ $\text{Ba}/n\text{-GaN}$ И $\text{Ba}/n\text{-AlGaN}$

Г. В. Бенеманская^{a*}, С. Н. Тимошнев^a, С. В. Иванов^a,
Г. Э. Франк-Каменецкая^b, Д. Е. Марченко^c, Г. Н. Имуридзе^d

^a Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук
194021, Санкт-Петербург, Россия

^b Санкт-Петербургский государственный технологический институт (ТУ)
190013, Санкт-Петербург, Россия

^c Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Elektronenspeicherring BESSY II
D-12489, Berlin, Germany

^d Georgian Technical University
0175, Tbilisi, Georgia

Поступила в редакцию 17 апреля 2013 г.

Проведены фотоэмиссионные исследования ФЭС *in situ* электронной структуры $n\text{-GaN}(0001)$, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}(0001)$ при $x = 0.16, 0.42$ и интерфейсов $\text{Ba}/n\text{-GaN}$, Ba/AlGaN в диапазоне субмонослойных Ва-покрытий. Изучены спектры фотоэмиссии из валентной зоны, спектры поверхностных состояний и остовных $3d$ -уровней Ga, $2p$ -уровней Al и $4d$ -, $5p$ -уровней Ba при синхротронном возбуждении в диапазоне энергий фотонов 50–400 эВ. Обнаружен спектр собственных поверхностных состояний $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0.16, 0.42$). Найдено, что в процессе формирования интерфейсов $\text{Ba}/n\text{-GaN}$ и Ba/AlGaN происходит существенное изменение электронной структуры поверхности и приповерхностной области. В первых, обнаружен эффект сужения спектра фотоэмиссии в области валентной зоны примерно от 10 эВ до 2 эВ и, во-вторых, наблюдается подавление собственных поверхностных состояний. Для интерфейсов $\text{Ba}/n\text{-GaN}$, $\text{Ba}/n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ найдено, что адсорбирует появление нового фотоэмиссионного пика в запрещенной зоне на уровне Ферми. Установлено, что природа пика связана с созданием аккумуляционного слоя за счет изменения приповерхностного потенциала и обогащающего изгиба зон. Показано, что энергетическими параметрами потенциальной ямы аккумуляционного слоя можно целенаправленно управлять за счет изменения степени Ва-покрытия.

DOI: 10.7868/S0044451014040119

1. ВВЕДЕНИЕ

Нитриды III группы представляют существенный интерес для развития оптоэлектронной техники на основе гетероструктур GaN/AlGaN, GaN/InGaN, применяемых в широкой спектральной области от ближней инфракрасной до ультрафиолетовой. Гетероструктуры GaN/AlGaN являются также важным элементом современной высокоомощной и высокочастотной электроники [1, 2]. Технические прило-

жения в микро- и нанoeлектронике предъявляют повышенные требования к знаниям о структурных и электронных свойствах поверхности GaN и AlGaN и, в частности, возможности создания поверхностных аккумуляционных слоев с высокой электронной плотностью и подвижностью. Как правило, поверхностные состояния оказывают сильное влияние на электронные свойства поверхности и интерфейсов, а также играют важную роль, например, при формировании вырожденного двумерного электронного газа (2DEG) в гетероструктурах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ и $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, одним из компонентов которых является GaN [3, 4].

*E-mail: Galina.Benemanskaya@mail.ioffe.ru

Электронная структура GaN(0001) достаточно подробно исследована экспериментально [5–9] и теоретически [10–13]. Спектр фотоэмиссии в области валентной зоны представляет собой слабо структурированную полосу шириной около 10 эВ ниже края валентной зоны E_{VBM} с некоторыми особенностями в спектре, природа которых, как правило, связана с поверхностными состояниями [10, 12]. Структурные исследования поверхностных реконструкций 1×1 , 2×2 , 5×5 , 6×4 GaN(0001) можно найти в работах [14, 15].

Методами ультрафиолетовой фотоэмиссионной спектроскопии (УФЭС) с угловым разрешением и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) установлены поверхностные состояния и их дисперсия для различных направлений в зоне Бриллюэна. Как показали экспериментальные исследования для Ga-полярной поверхности GaN(0001), спектр поверхностных состояний зависит от реконструкции поверхностных атомов Ga. Для реконструкции 2×2 GaN(0001) с использованием метода УФЭС были обнаружены поверхностные состояния в Γ -точке с энергиями 6.0 эВ, 4.0 эВ, 0.1 эВ, -0.9 эВ относительно вершины валентной зоны на поверхности E_{VBM} [5, 6]. В эксперименте поверхностная реконструкция 2×2 контролировалась методом дифракции быстрых электронов. Отметим, что одно состояние $S1 = -0.9$ эВ обнаружено в запрещенной зоне вблизи E_{VBM} . Для другой реконструкции 1×1 GaN(0001) в Γ -точке исследования показали три поверхностных состояния с энергиями 1.5 эВ, 4.0 эВ и 6.5 эВ относительно E_{VBM} [7]. Поверхностная атомная структура 1×1 при этом контролировалась методом дифракции медленных электронов. Для этой же реконструкции (1×1) GaN(0001) в работе [8] определены в Γ -точке другие энергии поверхностных состояний, 1.0 эВ, 2.0 эВ и 8.4 эВ, относительно E_{VBM} . Изучение угловых зависимостей фотоэмиссионных спектров УФЭС позволили получить детальную картину дисперсии поверхностных состояний для реконструкции 1×1 Ga-полярной поверхности GaN(0001) [9]. Таким образом, исследования показали достаточно богатый набор поверхностных состояний, причем энергии состояний в спектре зависят от поверхностной реконструкции. Здесь следует подчеркнуть, что только для реконструкции 2×2 в спектре фотоэмиссии наблюдалось состояние $S1 = -0.9$ эВ в запрещенной зоне.

На основе теории функционала плотности с использованием метода псевдопотенциала и приближения локальной плотности в ряде работ проведены расчеты двумерной плотности состояний для по-

верхности 1×1 GaN(0001) и получена дисперсия состояний для различных направлений в зоне Бриллюэна [10–12]. Для 1×1 GaN(0001) в Γ -точке определены состояния при энергиях 0.6 эВ, 3.8 эВ и 8.0 эВ относительно E_{VBM} , природа которых связана соответственно с p_x -, p_y -орбиталями N и Ga, с p_z -орбиталями N и Ga, с s -орбиталями Ga и p_z -орбиталями N [10]. Как видно, все состояния имеют отношение к оборванным связям поверхностных атомов Ga или к следующему от поверхности интерфейсному слою со связью Ga–N. В работе [11] для поверхности 2×2 GaN(0001) рассчитано распределение плотности поверхностных состояний оборванных связей атомов Ga. Получено, что в запрещенной зоне расположены поверхностные состояния, одно из которых является заполненным и отвечает атому Ga в позиции T4 между тремя поверхностными атомами Ga над атомом N во втором слое [14, 15].

Следует отметить, что как в экспериментальных, так и в теоретических работах получены различные данные относительно числа поверхностных состояний и их энергетического положения. Поэтому понимание природы электронных состояний поверхности GaN, которые определяют процессы образования интерфейсов в гетеро- и наноструктурах, а также изучение свойств этих интерфейсов — актуальная задача.

Гораздо меньше работ посвящено экспериментальным исследованиям тройных соединений $Al_xGa_{1-x}N$ [16, 17]. Методом РФЭС в области валентной зоны наблюдалась широкая полоса фотоэмиссии около 8 эВ. С увеличением содержания Al происходят некоторые изменения в спектре: увеличение интенсивности фотоэмиссионного пика при энергии 9 эВ относительно уровня Ферми и сдвиг всего спектра в сторону больших энергий связи примерно на 2 эВ за счет увеличения энергетического интервала $E_F - E_V$ [16]. Теоретические исследования зонной структуры, ширины запрещенной зоны и эффективных масс тройных соединений $Al_xGa_{1-x}N$, $In_xGa_{1-x}N$, $In_xAl_{1-x}N$ представлены в работе [18]. Поверхностные состояния $Al_xGa_{1-x}N$ не изучены.

Наиболее сильные изменения электронной структуры поверхности происходят на начальной стадии формирования интерфейсов металл/полупроводник при субмонослойных покрытиях. Значительное количество оборванных связей Ga на поверхности обеспечивает высокую химическую и адсорбционную активность поверхности GaN(0001) по аналогии с детально изученной поверхностью GaAs(100), обогащенной Ga [19]. Оборванные связи

Ga с sp^3 -гибридизацией присущи Ga-полярной поверхности GaN(0001).

Адсорбция цезия и кислорода на поверхности p -GaN(0001) исследована с помощью методов РФЭС и УФЭС [20]. Установлено, что адсорбция Cs вызывает дополнительный изгиб зон вниз и понижает уровень вакуума. Адсорбция Cs на поверхности n -GaN(0001) исследована при температуре 150 К с помощью методов УФЭС и контактной разности потенциалов [21, 22]. Установлены незначительные изменения в спектре валентной зоны, которые связывались авторами с подавлением собственных поверхностных состояний при энергиях ниже E_{VBM} . Конкретные энергии связи для поверхностных состояний не были определены, так как спектры не имели особенностей в виде отдельных максимумов. Адсорбция Ba на поверхности GaN до наших экспериментов не исследовалась. Нам не известны работы по исследованию адсорбции металлов на AlGaN.

Создание и исследование наноразмерных структур является важным как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Наноразмерные объекты можно определить как системы, в которых, по крайней мере, одно измерение не превышает 100 нм. В настоящее время зарядовый аккумуляционный слой на свободной поверхности полупроводника является новым и актуальным нанообъектом исследований. Аккумуляционный слой может сформироваться непосредственно вблизи поверхности полупроводника n -типа, когда приповерхностный изгиб зон достаточно велик и соответствует обогащению, а именно, изгибу зон вниз. При этом при образовании узкой потенциальной ямы минимум зоны проводимости на поверхности E_{CBM} должен располагаться ниже уровня Ферми E_F . При достаточно малой ширине приповерхностного потенциала происходит ограничение движения электронов в направлении нормали z к поверхности и наблюдается эффект размерного квантования в аккумуляционном слое, т. е. электроны могут занимать несколько локальных квантовых уровней. Вдоль поверхности xy движение электронов не ограничено и соответствующие компоненты энергии не квантуются. Такие электронные состояния являются вырожденным двумерным электронным газом 2DEG.

Аккумуляционный слой был недавно обнаружен для чистых поверхностей полупроводников n -InAs(110) [23], n -InN [24] и для ультратонких интерфейсов Cs/ n -InAs(110) [25], Cs/ n -InSb(110) [26], Cs/ n -GaN [27, 28], Ba/ n -GaN [28–30], Cs/InGaN [31], Ba/AlGaN [32]. Пространственная ширина аккумуляционного слоя соответствует примерно 20 нм, а

плотность состояний в 2DEG изменяется в диапазоне 10^{12} см $^{-2}$ – 10^{13} см $^{-2}$ [3, 26]. В настоящее время существует достаточно мало полупроводниковых материалов, на поверхности которых удалось наблюдать или искусственно создать аккумуляционный слой. Поэтому создание индуцированных аккумуляционных слоев на поверхности широкозонных полупроводников — нитридов III группы в ряду InGaN, GaN, AlGaN с изменяющейся шириной запрещенной зоны является актуальной задачей.

В настоящей работе проведены фотоэмиссионные исследования электронной структуры чистых поверхностей n -GaN(0001), n -Al $_{0.16}$ Ga $_{0.84}$ (0001) и Al $_{0.42}$ Ga $_{0.58}$ (0001) и интерфейсов Ba/ n -GaN(0001), Ba/ n -Al $_{0.16}$ Ga $_{0.84}$ (0001) и Ba/Al $_{0.42}$ Ga $_{0.58}$ (0001). С помощью ФЭС при синхротронном возбуждении исследована модификация спектров в области валентной зоны, спектров поверхностных состояний и остовных $3d$ -уровней Ga, $2p$ -уровней Al, $4d$ -, $5p$ -уровней Ba при субмонослойной адсорбции Ba. Адсорбция бария на поверхности GaN и AlGaN использовалась в качестве «атомарного» зонда и предоставляла возможность изучать электронные свойства в процессе формирования интерфейсов при локальных взаимодействиях адсорбированных атомов с поверхностью.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Фотоэмиссионные исследования выполнены на российско-германском канале синхротрона BESSY II (Берлин, Германия) с использованием метода фотоэмиссионной спектроскопии ФЭС при возбуждении в диапазоне энергий фотонов 50–400 эВ. Регистрировались фотоэлектроны в конусе, ориентированном по нормали к поверхности, возбуждающий пучок падал на поверхность образца под углом 45° , т. е. фотоэмиссионные спектры записаны в режиме нормальной фотоэмиссии. Исследования образцов n -GaN(0001), Al $_x$ Ga $_{1-x}$ N(0001) при $x = 0.16, 0.42$ и интерфейсов Ba/ n -GaN(0001), Ba/Al $_x$ Ga $_{1-x}$ N(0001) проводились *in situ* в вакууме ($P < 5 \cdot 10^{-10}$ Торр) в режиме пошаговой субмонослойной адсорбции при комнатной температуре. Регистрировались спектры нормальной эмиссии электронов в области валентной зоны, спектры поверхностных состояний, а также спектры остовных $3d$ -уровней Ga, $2p$ -уровней Al, $4d$ -, $5d$ -уровней Ba. Полное энергетическое разрешение составляло 50 мэВ.

Образец n -GaN(0001) толщиной 4.2 мкм выращивался методом осаждения из металлоорганических соединений MOCVD на сапфировой подложке и леги-

ровался кремнием с концентрацией $4.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Образец имел хорошо отрелаксированную систему протяженных дефектов с когерентным согласованием доменов мозаичной структуры и образованием дилатационных границ с низкой плотностью дислокаций, не более 10^8 см^{-2} , и подвижностью электронов $600 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ [29]. Ширина запрещенной зоны $E_g = 3.4 \text{ эВ}$.

Образцы AlGaN толщиной 1.2 мкм выращивались с помощью метода молекулярно-лучевой эпитаксии с плазменной активацией (РА МВЕ) на сапфировых подложках [33]. Температура роста составляла $T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$. Для получения желаемой концентрации Al использовано определенное соотношение Al к активированным потокам азота. Химический состав образцов AlGaN определялся независимыми методами, такими как электронно-зондовый микроанализ и рамановская спектроскопия. Аналитические методы показали, что концентрация Al в исследуемых образцах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ составляет $x = 0.16$ и $x = 0.42$. Оптические измерения показали величину запрещенной зоны соответственно $E_g = 3.7 \text{ эВ}$ и $E_g = 4.3 \text{ эВ}$. Для получения *n*-проводимости в образце с более низким содержанием Al ($x = 0.16$) использовано легирование Si. Концентрация электронов в $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ составляла $5.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что определено с помощью *C-V*-методики. Образец $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ обладал изоляционными свойствами [33].

Данные рентгеновского дифракционного анализа указывают на высокоупорядоченную структуру в слоях GaN и AlGaN. Поверхностная морфология образцов исследовалась атомно-силовой микроскопией (АСМ). АСМ-измерения проводились с помощью прибора Solver P-47H в полупроводниковом режиме зондами NSG11 (НТ-МДТ) с радиусом закругления 10–20 нм. Цифровая обработка АСМ-изображений поверхности образцов GaN и AlGaN дает среднеквадратичную шероховатость поверхностей RMS около 1 нм.

Перед фотоэмиссионными исследованиями образцы подвергались отжигу *in situ* при температуре 900 К. В спектре ФЭС после отжига наблюдался остаточный 1*s*-пик углерода (285 эВ) незначительной интенсивности. Атомарно-чистый Ва напылялся пошагово на чистую поверхность образца из стандартного источника, который был предварительно откалиброван по величине потока атомов Ва [31]. Ошибка в определении покрытия оценивается как ± 0.1 монослой (ML). При оценке Ва-покрытия учитывалось, что коэффициент прилипания Ва равен единице и не изменяется в пределах монослоя. При

адсорбции на поверхность полупроводника принято считать, что 1 монослой соответствует концентрации, при которой один атом металла приходится на один поверхностный атом подложки с реконструкцией 1×1 , т.е. в нашем случае на один атом галлия на поверхности $1 \times 1 \text{ GaN}(0001)$, что равняется $9.9 \cdot 10^{14} \text{ атом/см}^2$.

Для образцов $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ и $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ предполагается, что 1 ML соответствует концентрации, когда один атом Ва приходится на один атом из элементов III группы Al+Ga на поверхности $1 \times 1 \text{ AlGaN}$. Поскольку параметры решетки для GaN и для AlN различаются незначительно, для тройного соединения AlGaN можно предполагать, что 1 ML на AlGaN соответствует 1 ML на GaN. Кроме того, покрытия бария дополнительно оценивались по трансформации фотоэмиссионного пика остоного $4d$ -уровня Ва.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Фотоэмиссионные спектры *n*-GaN, *n*- $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ и $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$

На рис. 1 представлены обзорные спектры нормальной фотоэмиссии, полученные для чистых поверхностей $n\text{-GaN}(0001)$ и $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ при энергии возбуждения 400 эВ. Видно, что в спектре доминируют пики остоных $3d$ -уровней Ga, $2p$ -уровней Al, $3p$ -уровней Ga, $2s$ -уровней Al и $3s$ -уровней Ga при незначительной интенсивности

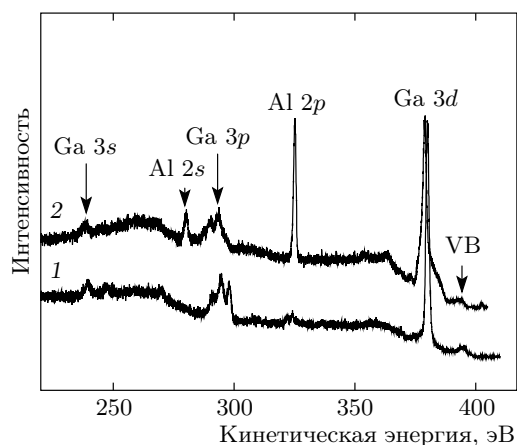


Рис. 1. Спектры нормальной фотоэмиссии $n\text{-GaN}(0001)$ (кривая 1) и $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ (кривая 2). Энергия возбуждения составляет 400 эВ

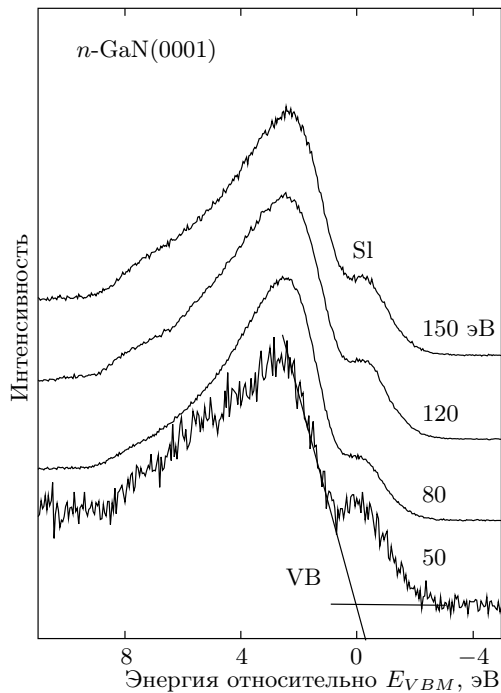


Рис. 2. Спектры нормальной фотоэмиссии в области валентной зоны для исходного образца $n\text{-GaN}(0001)$ при различных энергиях возбуждения

спектра фотоэмиссии в области валентной зоны (VB). Структура спектра в области валентной зоны исследуется, как правило, при меньших энергиях возбуждения, $h\nu < 130$ эВ [5–10]. Установлено также, что спектры остовных уровней более эффективно исследовать при энергиях возбуждения $h\nu > 150$ эВ.

Спектры фотоэмиссии в области валентной зоны $n\text{-GaN}$ подробно представлены на рис. 2 при разных энергиях возбуждения. Спектры приведены к энергии вершины валентной зоны на поверхности E_{VBM} , которая определяется линейной аппроксимацией низкоэнергетического края спектра (см. рис. 2). В области валентной зоны спектр исходного образца $n\text{-GaN}(0001)$ представляет собой слабоструктурированную полосу фотоэмиссии шириной около 10 эВ.

Полученные спектры находятся в хорошем согласии с известными экспериментальными данными [5, 6, 8, 10, 22, 34]. При этом значительная экспериментальная ширина спектра фотоэмиссии в области валентной зоны около 10 эВ существенно превышает величину равную 2 эВ, рассчитанную теоретически [10]. Несоответствие экспериментальных и те-

ретических данных в литературе объясняется, как правило, наличием в этой области собственных поверхностных состояний. Яркой особенностью спектров на рис. 2 является наличие пика поверхностного состояния $S1 = -0.4$ эВ, расположенного в запрещенной зоне $n\text{-GaN}$ на низкоэнергетическом крае фотоэмиссионного спектра вблизи E_{VBM} . Как отмечалось выше, для образцов $n\text{-GaN}(0001)$ поверхностное состояние $S1$ наблюдалось в работах [5, 6] только при поверхностной реконструкции 2×2 , причем природа этого состояния связана с оборванными связями Ga.

Спектры нормальной фотоэмиссии в области валентной зоны для чистого образца $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$, полученные при разных энергиях возбуждения, представлены на рис. 3а, спектры приведены к E_{VBM} . Установлено, что ширина спектра фотоэмиссии в области валентной зоны $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ соответствует примерно 9 эВ. Отметим, что поверхностные состояния для AlGaN до настоящего времени не изучались. Основываясь на исследованиях для GaN(0001) [6–8, 10, 12], можно предположить, что существенный вклад в форму спектров $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ вносят поверхностные состояния. На рис. 3б представлены спектры нормальной фотоэмиссии в области валентной зоны для чистого образца $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}(0001)$ при разных энергиях возбуждения, приведенные к E_{VBM} . Установлено, что ширина спектра фотоэмиссии в области валентной зоны чистого $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}(0001)$ также соответствует примерно 9 эВ.

На рис. 4 представлены спектры нормальной фотоэмиссии для чистых поверхностей $n\text{-GaN}(0001)$ (кривые 1) и $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ (кривые 2) при энергии возбуждения 100 эВ. Кривые иллюстрируют характерные фотоэмиссионные пики остовных $3d$ -уровней Ga и $2p$ -уровней Al, а также спектры фотоэмиссии в области валентной зоны. Спектры получены на одной и той же установке в аналогичных экспериментальных условиях. Можно отметить, что ширина и форма спектров фотоэмиссии в области валентной зоны для AlGaN и GaN практически совпадают за исключением пика поверхностного состояния $S1$ для $n\text{-GaN}$. Напомним, что ширина запрещенной зоны для $n\text{-GaN}$ и $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ составляет соответственно 3.4 эВ и 3.7 эВ. Следовательно, можно определить, что для обеих поверхностей характерен практически одинаковый обедняющий изгиб зон вверх 0.4–0.5 эВ. При этом учитывалось, что положение уровня Ферми на 0.1 эВ ниже дна зоны проводимости в объеме [34].

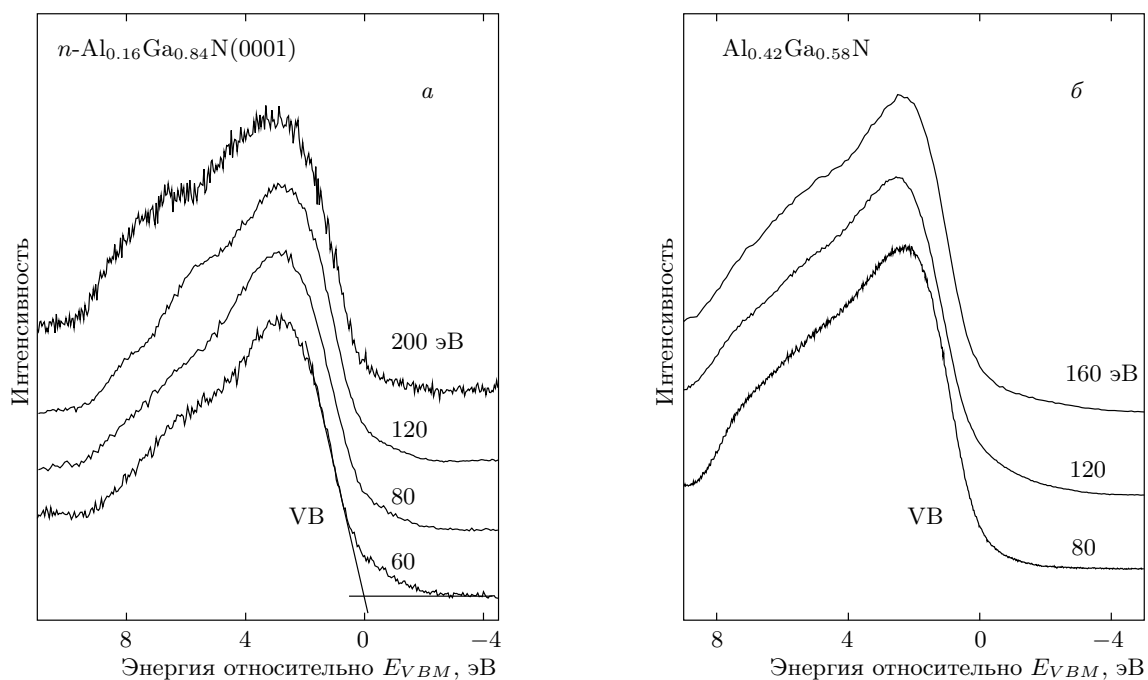


Рис. 3. Спектры нормальной фотоэмиссии в области валентной зоны для образцов $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ и $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}(0001)$ при различных энергиях возбуждения

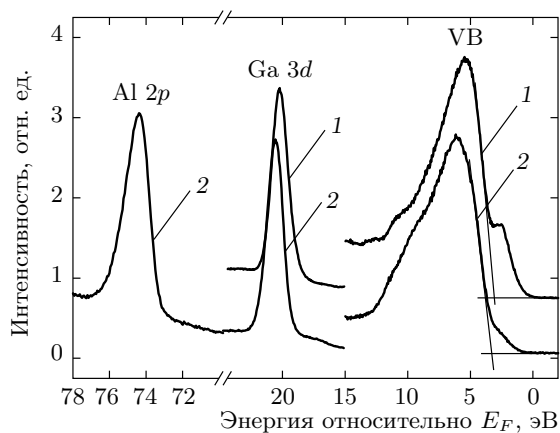


Рис. 4. Спектры нормальной фотоэмиссии в области валентной зоны и основных $3d$ -уровней Ga и $2p$ -уровней Al при энергии возбуждения $h\nu = 100$ эВ: 1 — $n\text{-GaN}(0001)$, 2 — $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$

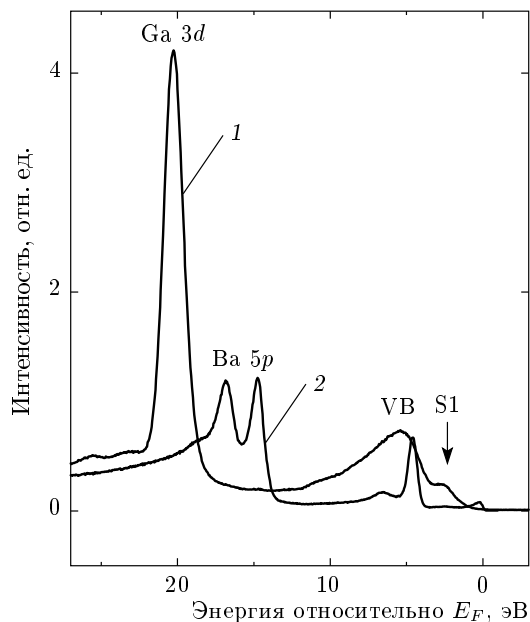


Рис. 5. Спектры нормальной фотоэмиссии: 1 — исходный образец $n\text{-GaN}(0001)$, 2 — Ba/ $n\text{-GaN}(0001)$ при Ba-покрытии 1.5 ML. Энергия возбуждения 120 эВ

3.2. Модификация поверхностных состояний $n\text{-GaN}$, $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ и $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ при адсорбции Ba

Адсорбция Ba на $n\text{-GaN}(0001)$ вызывает существенные изменения всех спектров фотоэмиссии. На рис. 5 представлены спектры нормальной фотоэмис-

сии в широком диапазоне энергий, иллюстрирующие эволюцию электронной структуры при форми-

ровании интерфейса Ва/*n*-GaN. Обнаружено, что адсорбция Ва изменяет форму спектра фотоэмиссии в области валентной зоны: спектр значительно сужается и подавляются поверхностные состояния, в частности S1 (кривая 2). Интенсивность пика основного 3*d*-уровня Ga с энергией связи 20.3 эВ уменьшается при адсорбции. В процессе формирования интерфейса можно видеть появление пика основного 5*p*-уровня Ва с дублетной структурой 5*p*_{3/2} (14.8 эВ) и 5*p*_{1/2} (16.9 эВ) (кривая 2).

При пошаговой адсорбции Ва детально исследовались изменения в фотоэмиссионных спектрах *n*-GaN и AlGaN в области валентной зоны. На рис. 6а представлена поэтапная эволюция спектра фотоэмиссии для *n*-GaN. Спектры приведены к одинаковой интенсивности в максимумах. Обнаружено, что наиболее сильные изменения наблюдаются в области энергий связи 2–8 эВ, где интенсивность фотоэмиссии резко уменьшается при увеличении барьерного покрытия. Исходная слабоструктурированная полоса фотоэмиссии в области валентной зоны изменяется уже при Ва-покрытии 0.25 ML, при котором исчезает из спектра пик S1 (–0.4 эВ) и ярко проявляются 3 пика собственных поверхностных состояний S2 (2.7 эВ), S3 (5.0 эВ), S4 (6.5 эВ). В процессе формирования интерфейса Ва/*n*-GaN(0001) при Ва-покрытии 1.5 ML наблюдается значительное уменьшение ширины спектра в области валентной зоны примерно от 10 эВ до 2 эВ. Анализ показывает, что эффект сужения спектра вызван подавлением собственных поверхностных состояний GaN. Как показывают теоретические расчеты, в одностадийной модели объемной фотоэмиссии для GaN(0001) при энергиях возбуждения 20–80 эВ [10] спектр нормальной фотоэмиссии из валентной зоны имеет максимум вблизи E_{VBM} и полуширину примерно 2 эВ, что соответствует возбуждению электронных состояний из вершины валентной зоны. Наши экспериментальные данные в основном согласуются с расчетами, где ширина главного максимума фотоэмиссии из валентной зоны соответствует примерно 2 эВ [10].

Фотоэмиссионные спектры исследованы при адсорбции Ва в субмонослойном диапазоне покрытий на поверхности *n*-Al_{0.16}Ga_{0.84}N(0001) и на поверхности Al_{0.42}Ga_{0.58}N(0001). Как и в случае *n*-GaN, адсорбция Ва вызывает кардинальные изменения всех спектров фотоэмиссии. На рис. 6б представлена поэтапная эволюция спектра фотоэмиссии в области валентной зоны для Al_{0.42}Ga_{0.58}N по мере увеличения Ва-покрытия. Спектры приведены к одинаковой интенсивности в максимумах. Наиболее сильные изменения наблюдаются в области валентной зоны

при энергиях связи 0–9 эВ. Аналогично изменениям спектров для *n*-GaN, обнаружен эффект уменьшения ширины спектра в области валентной зоны примерно от 9 эВ до 3 эВ при Ва-покрытии 0.9 ML. Можно полагать, что эффект сужения спектра вызван подавлением собственных поверхностных состояний, причем структура поверхностных состояний четко проявляется именно в процессе формирования интерфейса при малых субмонослойных покрытиях Ва. Это позволило для Al_{0.42}Ga_{0.58}N идентифицировать собственные поверхностные состояния, энергии связи которых соответствуют 3.9 эВ, 5.6 эВ и 8.2 эВ относительно E_{VBM} . При адсорбции Ва на поверхности *n*-Al_{0.16}Ga_{0.84}N(0001) также обнаружены собственные поверхностные состояния, энергии связи которых соответствуют 2.8 эВ, 5.5 эВ и 7.8 эВ относительно E_{VBM} .

Таким образом, в процессе формирования интерфейса Ва/*n*-GaN(0001) обнаружены ярко выраженные изменения структуры спектра в области валентной зоны. Для подробного анализа модификации электронной структуры из экспериментальных спектров нормальной фотоэмиссии был вычтен фон неупруго рассеянных электронов с использованием метода Ширли и далее полученные спектры нормировались на максимум интенсивности. При разложении спектров использовались линейные комбинации функций Гаусса. На рис. 7 представлены результаты разложения спектров фотоэмиссии в области валентной зоны для чистого образца *n*-GaN(0001) и в случае Ва-покрытий. Это позволяет более подробно проанализировать спектры поверхностных состояний и валентной зоны, а также их эволюцию в процессе формирования интерфейса. Видно, что при увеличении покрытия до 0.25 ML подавляется поверхностное состояние S1 с энергией –0.4 эВ (рис. 7б). Поверхностные состояния S4 (6.5 эВ) и S3 (5.0 эВ) последовательно подавляются при увеличении Ва-покрытия и отсутствуют в спектре при 1.5 ML (рис. 7в). Состояние S2 с энергией связи 2.7 эВ менее чувствительно к адсорбции и остается в спектре даже при Ва-покрытии 1.5 ML. Можно предположить, что природа состояния S2 связана со вторым от поверхности слоем и это состояние является интерфейсным [9].

На рис. 8 суммированы данные по изменению интенсивности фотоэмиссии из валентной зоны и интенсивности поверхностных состояний при увеличении Ва-покрытия. Видно, что поверхностные состояния S1, S4, S3 исчезают последовательно по мере увеличения Ва-покрытия на GaN(0001). При покрытии 0.25 ML подавляется наиболее чувствительное

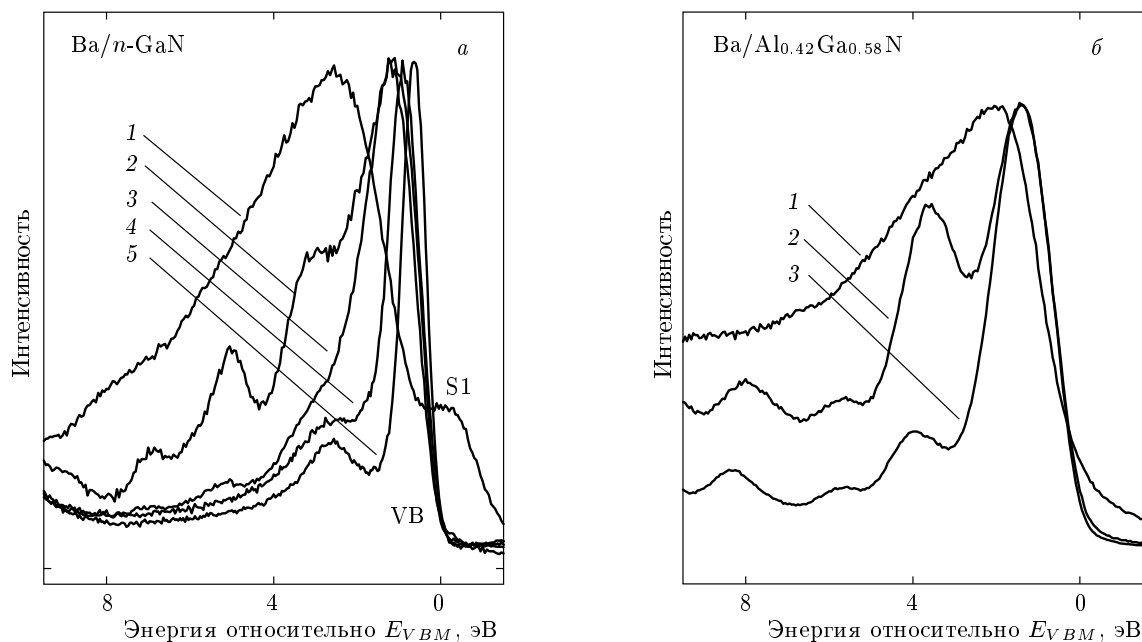


Рис. 6. Спектры нормальной фотоэмиссии в области валентной зоны: *а)* $\text{Ba}/n\text{-GaN}(0001)$ при Ва-покрытиях: 1 — чистый образец, 2 — 0.25 ML, 3 — 0.5 ML, 4 — 0.9 ML, 5 — 1.5 ML; *б)* $\text{Ba}/\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}(0001)$ при Ва-покрытиях: 1 — чистый образец, 2 — 0.3 ML, 3 — 0.9 ML. Энергия возбуждения 120 эВ

к адсорбции поверхностное состояние S1. Затем при Ва-покрытиях 0.5 ML и 0.9 ML подавляются соответственно поверхностные состояния S4 и S3. Интенсивность фотоэмиссии из состояния S2 падает в 5 раз при покрытии Ва 1.5 ML. При адсорбции Ва происходит рост интенсивности фотоэмиссии из валентной зоны (рис. 8). Это может найти объяснение в изменении состояния поверхностного слоя атомов Ga, который становится «квазиобъемным» при взаимодействии с адатомами Ва. Более точную интерпретацию результатов могут дать только теоретические расчеты.

Как отмечено выше, отличительной особенностью спектров фотоэмиссии для GaN является наличие пика поверхностного состояния S1 в запрещенной зоне, которое наблюдается только для реконструкции 2×2 $n\text{-GaN}(0001)$ [5]. Опираясь на данные работы [5], можно полагать, что в нашем случае наличие в спектре состояния $S1 = -0.4$ эВ в запрещенной зоне указывает на реконструкцию 2×2 поверхности GaN(0001) в исходном состоянии до адсорбции Ва. Структурная модель 2×2 GaN(0001) предполагает несколько адсорбционных позиций для адсорбированных атомов: T4, T1, H3 [14, 15]. Причем полагается [5], что поверхностное состояние S1 связано с позицией T4 между тремя поверхностными ато-

мами Ga над атомом N во втором слое. Исчезновение пика S1 поверхностного состояния наблюдалось при адсорбции кислорода и воды на 2×2 GaN(0001) [5, 6]. Позиции T4 занимают на поверхности четвертую часть от полного числа атомов Ga. Экспериментальные данные (рис. 7, 8) согласуются с данной моделью, а именно, число позиций T4 (0.25 ML) хорошо соответствует покрытию адатомов Ва (0.25 ML), при котором полностью заполняются места адсорбции T4 и исчезает поверхностное состояние S1. Поверхностные состояния S4 и S3 исчезают при покрытиях Ва соответственно 0.5 ML и 0.9 ML. Можно предположить, что с увеличением Ва-покрытия после заполнения позиций T4 адсорбция происходит в позиции T1 и H3. Позиции T1 соответствуют положению адсорбированных атомов Ва непосредственно на свободных поверхностных атомах Ga, оставшиеся позиции H3 соответствуют положению адатомов Ва между тремя поверхностными атомами N. Наши данные не позволяют определить, в какой последовательности происходит адсорбция в позиции T1 и H3. Можно только отметить, что одна из позиций заполняется при увеличении Ва-покрытия раньше другой.

Таким образом, установлено, что адсорбция Ва на поверхность $n\text{-GaN}(0001)$ позволяет выявить и

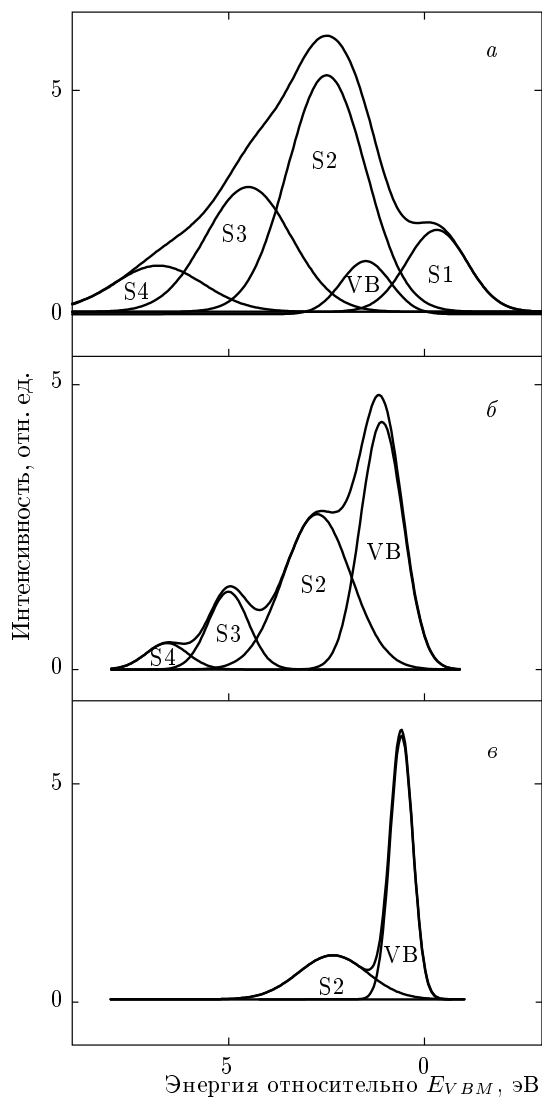


Рис. 7. Результат разложения спектров фотоэмиссии в области валентной зоны и поверхностных состояний *n*-GaN(0001) при различных субмонослойных покрытиях Ва: *a* — чистый образец, *б* — 0.25 ML, *в* — 1.5 ML; энергия возбуждения $h\nu = 120$ эВ

более точно определить положение собственных поверхностных состояний, а также экспериментально получить спектр фотоэмиссии из валентной зоны *n*-GaN(0001) без вклада поверхностных состояний. Положение и ширина экспериментального спектра хорошо согласуются с результатами расчетов спектров нормальной фотоэмиссии из валентной зоны GaN(0001) [10].

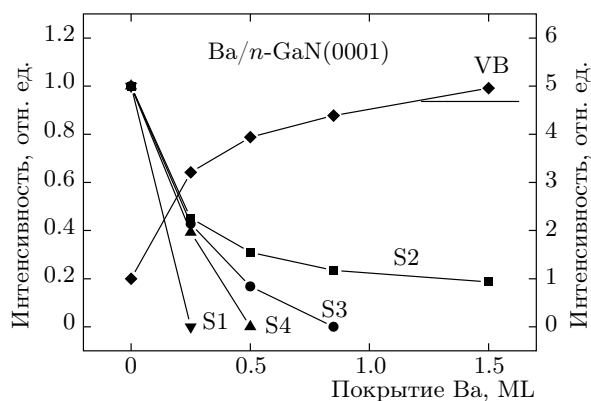


Рис. 8. Подавление собственных поверхностных состояний S1, S2, S3 и S4 и поведение пика VB *n*-GaN(0001) при различных субмонослойных покрытиях Ва

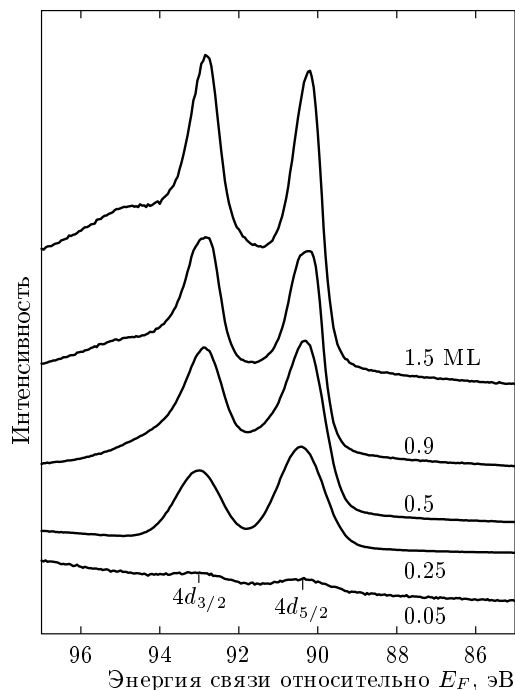


Рис. 9. Спектры нормальной фотоэмиссии основного 4*d*-уровня Ва при различных покрытиях Ва на *n*-GaN(0001). Энергия возбуждения 120 эВ

3.3. Фотоэмиссионные спектры основных 4*d*-уровней Ва

На рис. 9 представлена эволюция спектров фотоэмиссии для спин-расщепленных компонентов основного 4*d*-уровня Ва ($4d_{3/2}$ и $4d_{5/2}$) при увеличении покрытия Ва на поверхности *n*-GaN(0001). При малом Ва-покрытии, примерно 0.05 ML, в фотоэмиссион-

ном спектре наблюдаются два основных компонента, $4d_{3/2}$ и $4d_{5/2}$, при энергиях связи соответственно 90.3 эВ и 92.6 эВ, интенсивность которых увеличивается с ростом покрытия (рис. 9). При покрытиях, больших чем 0.9 ML, четко видно появление дополнительного пика в виде плеча в фотоэмиссионном спектре основного $4d$ -уровня Ва при энергии связи 95 эВ (рис. 9).

Как правило, барий адсорбируется на поверхности полупроводника слой за слоем при комнатной температуре. Присутствие дополнительных спин-расщепленных компонентов означает либо появление структурно различных мест для адсорбированных атомов Ва на поверхности, либо формирование второго монослоя Ва и появление Ва–Ва-взаимодействия [35, 36]. В нашем случае природа двух основных пиков $4d_{3/2}$ и $4d_{5/2}$ при энергиях соответственно 90.3 эВ и 92.6 эВ связана с локальным взаимодействием адсорбированных атомов Ва с Ga-оборванными связями. Поверхностная концентрация адатомов Ва при покрытии 0.9 ML является достаточной для начальной стадии формирования второго монослоя Ва и, следовательно, для возникновения Ва–Ва-взаимодействия во втором слое, что может приводить к появлению дополнительных пиков фотоэмиссии основного $4d$ -уровня Ва [36]. Таким образом, эволюция основных и появление дополнительного пика основного $4d$ -уровня Ва предоставляют еще один способ оценки поверхностной концентрации адатомов Ва.

3.4. Формирование аккумуляционного слоя

В настоящей работе приведены данные ФЭС, которые показывают изменения электронной структуры вблизи вершины валентной зоны и уровня Ферми для Ва/ n -GaN(0001) и Ва/ n -Al_{0.16}Ga_{0.84}N(0001) в процессе формирования интерфейсов при субмонослойных Ва-покрытиях. На рис. 10 представлен еще один эффект адсорбции Ва, а именно, возникновение в спектре нового фотоэмиссионного пика AL, который расположен в запрещенной зоне на уровне Ферми. Пик AL явно виден при адсорбции Ва на GaN при покрытии около 0.9 ML, при адсорбции Ва на Al_{0.16}Ga_{0.84}N при покрытии около 1.0 ML.

С ростом субмонослойного Ва-покрытия интенсивность пика AL и его энергетическая ширина увеличиваются. Возникновение пика AL сопровождается существенным изменением положения вершины валентной зоны E_{VBM} относительно уровня Ферми $\Delta = E_{VBM} - E_F$. Как известно, для чистой поверхности n -GaN(0001) величина $\Delta = 2.9 \pm 0.1$ эВ

[11, 16, 17, 33]. При Ва-покрытии 0.9 ML положение края валентной зоны относительно уровня Ферми составляет $\Delta = 3.8$ эВ. Дальнейшее увеличение покрытия до 1.5 ML увеличивает интервал $\Delta = 4.0$ эВ. Важно подчеркнуть, что величина $\Delta = 4.0$ эВ заметно превышает ширину запрещенной зоны E_g , которая для образца GaN составляет $E_g = 3.4$ эВ. Такое неординарное поведение возможно только при изгибе зон вниз, когда край зоны проводимости на поверхности располагается ниже уровня Ферми (см. рис. 11). Таким образом, природа нового фотоэмиссионного пика AL может быть связана с формированием зарядового аккумуляционного слоя в узкой пространственной области вблизи поверхности образца. С ростом Ва-покрытия происходит увеличение изгиба зон, возрастает глубина потенциальной ямы аккумуляционного слоя. Индуцированный адсорбцией изгиб зон вниз обеспечивает значительное увеличение интервала Δ .

Таким образом, обнаружено, что при формировании границы раздела Ва/ n -GaN(0001) наблюдается эффект образования зарядового аккумуляционного слоя. Адсорбция Ва на поверхности n -GaN вызывает перераспределение электронной плотности, которое происходит, главным образом, благодаря взаимодействию электронов поверхностных состояний и адсорбированных атомов Ва. Этот процесс приводит к подавлению собственных поверхностных состояний подложки (рис. 6) и перетеканию заряда в узкую приповерхностную область (около 10 нм) с образованием аккумуляционного слоя AL и вырожденного 2DEG, что обеспечивает возникновение нового фотоэмиссионного пика AL (рис. 10). Создание аккумуляционного слоя обеспечивает фазовый квазипереход металл–полупроводник при движении по нормали от поверхности вглубь образца. Фотоэмиссия из аккумуляционного слоя была обнаружена ранее для интерфейсов Ва, Cs/ n -GaN(0001) методом пороговой фотоэмиссионной спектроскопии, что является прямым доказательством формирования аккумуляционного слоя и 2DEG [27–30].

Отметим также, что природа пика фотоэмиссии AL может быть связана не только с созданием вырожденного двумерного электронного газа в аккумуляционном слое, но и с возможным вкладом в фотоэмиссию поверхностных состояний, индуцированных адсорбцией Ва. В работе [30] определено энергетическое положение поверхностных состояний, индуцированных адсорбцией Ва на GaN(0001). Были найдены два индуцированных поверхностных состояния при энергиях 0.1 эВ и 0.3 эВ ниже уровня Ферми, которые вполне вероятно могут давать вклад в

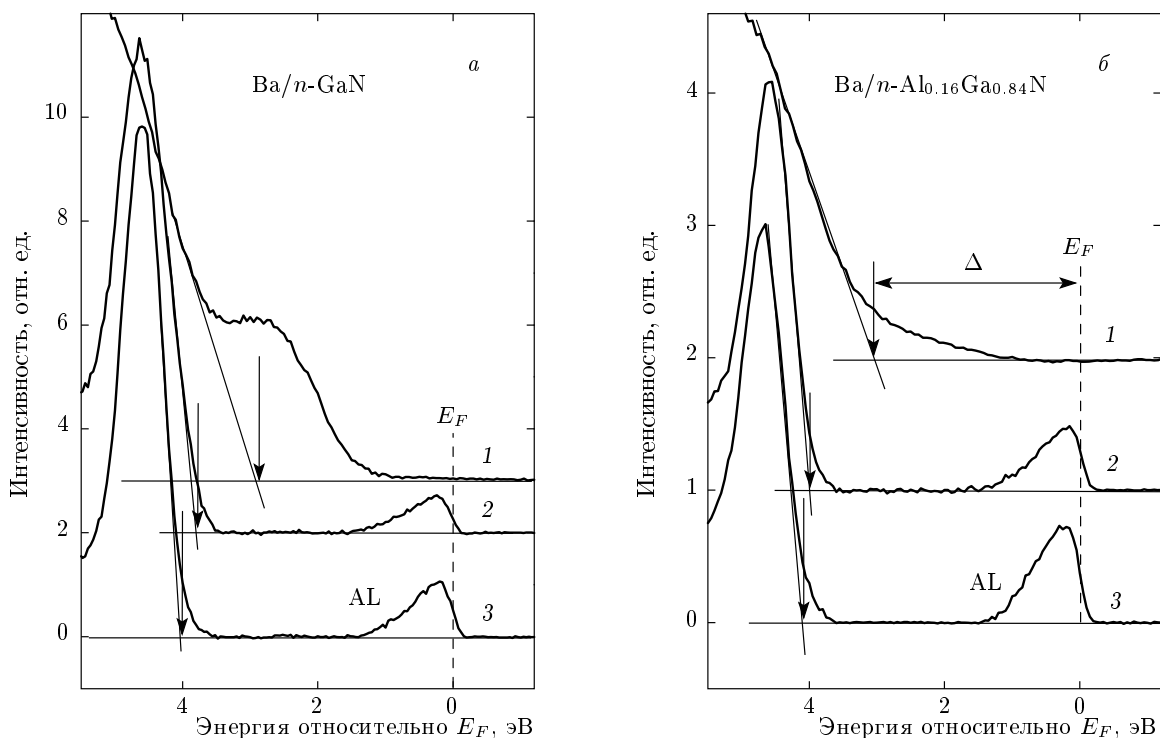


Рис. 10. Спектры нормальной фотоэмиссии в области валентной зоны и аккумуляционного слоя AL при различных покрытиях Ba а) для $n\text{-GaN}(0001)$: 1 — чистый образец, 2 — 0.9 ML, 3 — 1.5 ML; б) для $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$: 1 — чистый образец, 2 — 1.0 ML, 3 — 1.7 ML. Энергия возбуждения 120 эВ

интенсивность пика AL.

Для поверхности $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ при адсорбции Ba также обнаружено возникновение в спектре фотоэмиссии нового пика в запрещенной зоне вблизи уровня Ферми, природа которого связана с созданием 2DEG в аккумуляционном слое (рис. 10б). С ростом субмонослойного Ba-покрытия интенсивность пика и его энергетическая ширина увеличиваются. Рост Ba-покрытия приводит к резкому изменению величины Δ , что свидетельствует об изгибе зон вниз и доказывает образование аккумуляционного слоя. Как видно из рис. 10б, при Ba-покрытии 1.0 ML на $n\text{-AlGaN}$ положение края валентной зоны относительно уровня Ферми составляет $\Delta = 4.0$ эВ. Дальнейшее увеличение Ba-покрытия до 1.7 ML увеличивает интервал $\Delta = 4.1$ эВ. Это существенно больше значения $\Delta = 3.2$ эВ для чистой поверхности $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ [16]. Важно подчеркнуть также, что величина $\Delta = 4.1$ эВ заметно превышает ширину запрещенной зоны $E_g = 3.7$ эВ для образца $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$.

Исследование эволюции спектров фотоэмиссии для интерфейса $\text{Ba}/\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ показывает, что даже при значительных Ba-покрытиях, примерно

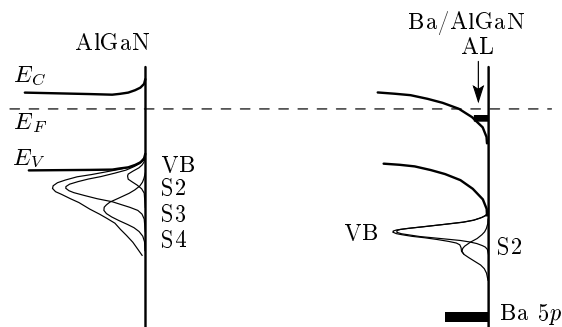


Рис. 11. Схематическое изображение приповерхностного изгиба зон и спектр фотоэмиссии в области валентной зоны и поверхностных состояний: слева — для чистой поверхности $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$, справа — для интерфейса $\text{Ba}/n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$

до 2 ML, в спектре не наблюдается появление каких-либо особенностей или пиков на уровне Ферми. Можно считать, что на поверхности $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ адсорбция Ba не приводит к формированию аккумуляционного слоя. Это может быть связано с

изолирующими свойствами эпитаксиального слоя $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ и с расположением уровня Ферми глубоко в запрещенной зоне, что препятствует достаточному изгибу зон.

На рис. 11 представлена схема электронной структуры для чистой поверхности $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ и для интерфейса $\text{Ba}/n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$. Для $n\text{-GaN}(0001)$ и для интерфейса $\text{Ba}/n\text{-GaN}(0001)$ схематическое представление электронных состояний имеет сходную структуру за исключением дополнительного поверхностного состояния S1 для $\text{GaN}(0001)$. Энергетическая схема для чистой поверхности $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ с характерным обедняющим изгибом зон вверх (около 0.5 эВ) представлена на рис. 11 слева. Также представлен спектр фотоэмиссии из валентной зоны и из поверхностных состояний. В случае Ва-адсорбции на $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ изгиб зон изменяется таким образом, что край зоны проводимости на поверхности располагается ниже уровня Ферми и в приповерхностной области формируется аккумуляционный слой (рис. 11 справа). Образование двумерного вырожденного электронного газа в потенциальной яме аккумуляционного слоя приводит к металлизации приповерхностной области и к двумерному фазовому переходу полупроводник–металл. Процесс формирования пика AL сопровождается подавлением собственных поверхностных состояний и сужением спектра фотоэмиссии из области валентной зоны примерно от 9 эВ до 3 эВ (рис. 11 справа).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во-первых, в работе найдены собственные поверхностные состояния с энергиями -0.4 эВ, 2.7 эВ, 5.0 эВ 6.5 эВ; 2.8 эВ, 5.5 эВ, 7.8 эВ и 3.9 эВ, 5.6 эВ, 8.2 эВ относительно E_{VBM} соответственно для $n\text{-GaN}(0001)$, $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ и $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}(0001)$.

Во-вторых, обнаружено, что электронные свойства поверхностей $n\text{-GaN}(0001)$, $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ и $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}(0001)$ существенно изменяются в процессе формирования интерфейсов под действием субмонослойной адсорбции Ва.

В-третьих, при увеличении Ва-покрытий обнаружено поэтапное подавление собственных поверхностных состояний, которое происходит при различных Ва-покрытиях, соответствующих адсорбции в различные структурные позиции на

поверхности $n\text{-GaN}(0001)$, $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ и $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}(0001)$. Природа эффекта подавления связана с локальным взаимодействием адатомов Ва с оборванными связями атомов Ga и Al на поверхности. Одновременно с эффектом подавления поверхностных состояний наблюдается сужение спектра фотоэмиссии в области валентной зоны примерно от 10 эВ до 2 эВ.

В-четвертых, обнаружено, что при адсорбции Ва на поверхности $n\text{-GaN}(0001)$ и $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ наблюдается появление нового фотоэмиссионного пика на уровне Ферми, природа которого связана с формированием аккумуляционного слоя и 2DEG в узкой приповерхностной области. Для образца $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}(0001)$ формирование аккумуляционного слоя не обнаружено.

Авторы выражают благодарность М. Н. Лапушкину, Н. М. Шмидт, В. Н. Жмерику, Д. В. Вялых и А. В. Нелюбову за плодотворные дискуссии и помощь в эксперименте. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Президиума РАН в рамках программы «Квантовые мезоскопические и неупорядоченные системы» (проект 10.4). Авторы также выражают благодарность российско-германской лаборатории синхротрона BESSY II.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Sweda, *Gallium Nitride & Related Wide Bandgap Materials & Devices: a Market and Technology Overview 1998–2003*, 2nd ed. Oxford, UK: Elsevier Adv. Technol. (2000).
2. P. Ruterana, M. Albrecht, and J. Neugebauer, *Nitride semiconductors. Handbook on Materials and Devices*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA, Weinheim (2003).
3. S. Heikman, S. Keller, Y. Wu et al., *Appl. Phys.* **93**, 10114 (2003).
4. K. Köhler, S. Müller, R. Aidam et al., *Appl. Phys.* **107**, 053711 (2010).
5. P. Lorenz, R. Gutt, T. Haensel et al., *Phys. Stat. Sol. C* **7**, 169 (2010).
6. A. Eisenhardt, P. Lorenz, M. Himmerlich et al., *World J. Engineering* **6**, 211 (2009).
7. S. M. Widstrand, K. O. Magnusson, L. S. O. Johansson, and M. Oshima, *Surf. Sci.* **584**, 169 (2005).
8. S. S. Dhesi, C. B. Stagaescu, K. E. Smith et al., *Phys. Rev. B* **56**, 10271 (1997).

9. Y.-C. Chao, C. B. Stagarescu, J. E. Downes et al., *Phys. Rev. B* **59**, R15586 (1999).
10. T. Strasser, C. Solterbeck, F. Starrost, and W. Schatke, *Phys. Rev. B* **60**, 11577 (1999).
11. D. Segev and C. G. Van de Walle, *J. Cryst. Growth* **300**, 199 (2007).
12. F.-H. Wang, P. Krüger, and J. Pollmann, *Phys. Rev. B* **64**, 035305 (2001).
13. D. Yujie, C. Benkang, W. Xiaohui et al., *Appl. Surf. Sci.* **258**, 7425 (2012).
14. Р. З. Бахтизин, Ч.-Ж. Шые, Ч.-К. Шые и др., *УФН* **174**, 383 (2004).
15. K. Rapcewicz, M. B. Nardelli, and J. Bernholc, *Phys. Rev. B* **56**, R12725 (1997).
16. A. Rizzi, M. Kocan, J. Malindretos et al., *Appl. Phys. A* **87**, 505 (2007).
17. T. Kozava, T. Mori, T. Owaki et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, L772 (2000).
18. M. Goano, E. Bellotti, E. Ghillino et al., *Appl. Phys.* **88**, 6476 (2000).
19. F. Bechsted and M. Scheffler, *Surf. Sci. Rep.* **18**, 148 (1993).
20. C. I. Wu and A. Kahn, *J. Appl. Phys.* **86**, 3209 (1999); *Appl. Surf. Sci.* **162–163**, 250 (2000).
21. M. Eyckeler, W. Mönch, T. U. Kampen et al., *J. Vac. Sci. Technol. B* **16**, 2224 (1998).
22. C. I. Wu, A. Kahn, N. Taskar et al., *Appl. Phys.* **83**, 4249 (1998).
23. L. Ö. Olsson, C. B. M. Andersson, M. C. Håkansson et al., *Phys. Rev. Lett.* **76**, 3626 (1996).
24. L. Colakerol, T. D. Veal, H.-K. Jeong et al., *Phys. Rev. Lett.* **97**, 237601 (2006).
25. K. Szamota-Leandersson, M. Göthelid, M. Leandersson, and U. O. Karlsson, *Appl. Surf. Sci.* **252**, 5267 (2006).
26. M. G. Betti, V. Corradini, G. Bertoni et al., *Phys. Rev. B* **63**, 155315 (2001).
27. G. V. Benemanskaya, V. S. Vikhnin, N. M. Schmidt et al., *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1365 (2004).
28. G. V. Benemanskaya, M. N. Lapushkin, and S. N. Timoshnev, *Surf. Sci.* **603**, 2474 (2009).
29. Г. В. Бенеманская, Г. Е. Франк-Каменецкая, Н. М. Шмидт, М. С. Дунаевский, *ЖЭТФ* **130**, 506 (2006).
30. Г. В. Бенеманская, Г. Э. Франк-Каменецкая, *Письма в ЖЭТФ* **81**, 642 (2005).
31. G. V. Benemanskaya, S. V. Ivanov, and M. N. Lapushkin, *Sol. Stat. Comm.* **143**, 476 (2007).
32. Г. В. Бенеманская, В. Н. Жмерик, М. Н. Лапушкин, С. Н. Тимошнев, *Письма ЖЭТФ* **91**, 739 (2010).
33. V. N. Jmerik, T. V. Shubina, A. M. Mizerov et al., *J. Cryst. Growth* **311**, 2080 (2009).
34. V. M. Bermudez, *Appl. Phys.* **80**, 1190 (1996).
35. T. Okuda, K.-S. An, A. Harasawa, and T. Kinoshita, *Phys. Rev. B* **71**, 085317 (2005).
36. T.-W. Pi, I.-H. Hong, and C.-P. Cheng, *Phys. Rev. B* **58**, 4149 (1998).