

Особенности фотоэлектрических свойств изотипных и анизотипных гетеропереходов Si/GaN(O)

© С.Е. Александров, Т.А. Гаврикова, В.А. Зыков

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 2 марта 2000 г. Принята к печати 28 апреля 2000 г.)

Приводятся результаты комплексного исследования электрических и фотоэлектрических свойств изотипных (p -Si/ p -GaN(O)) и анизотипных (n -Si/ p -GaN(O)) гетеропереходов, изготовленных химическим осаждением пленок твердых растворов GaN(O) на кремниевые подложки путем пиролизического разложения моноаммиака хлорида галлия в присутствии паров воды. В токовом режиме при прямых и обратных смещениях проведены измерения интегральной и спектральной fotocувствительности, кинетики фотоответа; исследованы вольт-амперные характеристики, фотоэдс насыщения. Установлено, что в обоих типах гетеропереходов распределение зарядов в приконтактных областях определяется преимущественно захватом носителей на граничные состояния (плотность которых по оценке составляет $\sim 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$) с образованием обедненных слоев по обе стороны от границы раздела. Проанализированы механизмы формирования fotocувствительности в анизотипных и изотипных гетеропереходах. Показано, что дифференциальный вид кинетики фотоотклика связан с перезарядкой состояний на границе раздела компонентов. Сильный рост фотоотклика изотипного гетероперехода при приложении смещения связывается с фототранзисторным эффектом. Предложенные модели энергетических зон гетеропереходов непротиворечиво объясняют наблюдаемые эффекты.

Большая ширина запрещенной зоны ($E_g = 3.4 \text{ эВ}$) объясняет интерес к нитриду галлия как к перспективному материалу для изготовления детекторов и излучателей света коротковолновой части видимого спектрального диапазона. Введение кислорода в нитрид галлия сопровождается образованием оксинитридных твердых растворов GaN(O) и приводит к увеличению ширины запрещенной зоны вплоть до 3.9 эВ [1]. Это обстоятельство позволяет надеяться на возможность создания на основе оксинитридов приемников излучения на ультрафиолетовый (УФ) диапазон. Использование оксинитрида галлия в качестве компонента гетероперехода (ГП) и создание на его основе прибора, сочетающего достоинства ГП и возможности оксинитрида, расширяет перспективы практического использования этого материала. Первые попытки создания приемника излучения на основе ГП Si/GaN(O) показали, что такой прибор обладает fotocувствительностью в широком спектральном диапазоне [1].

В настоящей работе, являющейся продолжением [1], приводятся результаты комплексного исследования электрических и фотоэлектрических свойств изотипных (p -Si/ p -GaN(O)) и анизотипных (n -Si/ p -GaN(O)) гетеропереходов. Предпринята попытка анализа механизмов формирования fotocувствительности с учетом зонных диаграмм изотипных и анизотипных ГП Si/GaN(O).

Гетероструктуры были получены химическим осаждением пленок оксинитрида галлия на подложки n - и p -Si ориентации (100) (КЭФ-7.5 и КДБ-10 соответственно). Пленки GaN(O) с различным содержанием кислорода выращивались из газовой фазы в хлоридно-гидридной системе путем пиролизического разложения моноаммиака хлорида галлия (gallium trichloride ammonia complex — GTAC) по методике, описанной в [1]. Концентрация носителей тока (дырок) в плен-

ках в зависимости от содержания кислорода составляла $p = 5 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

На полученных гетероструктурах были проведены измерения интегральной fotocувствительности, кинетики фотоответа, спектральной fotocувствительности, исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ). Сигнал фотоответа U_{ph} измерялся в режиме короткого замыкания при различных смещениях U на ГП. Все измерения проводились при освещении ГП со стороны широкозонного материала. Измерение кинетики сигнала фотоответа проводилось путем регистрации осциллограмм фотоотклика при освещении ГП прямоугольными световыми импульсами длительностью 2–10 мс. В качестве источника служил светодиод на основе GaAs с длиной волны излучения $\lambda = 0.85 \text{ мкм}$. Измерения проводились в области линейности люкс-амперной характеристики.

Все исследованные ГП, как изотипные ($p-p$), так и анизотипные ($n-p$), обладали fotocувствительностью при нулевом смещении. Результаты измерений представлены в таблице. Величины сигнала фотоответа анизотипных ГП значительно (почти на 3 порядка) превышают соответствующие значения для изотипных ГП. Такое превышение fotocувствительности анизотипных ГП по сравнению с изотипными наблюдалось при всех концентрациях кислорода в пленке оксинитрида, характеризующих соотношением давлений паров воды и моноаммиака хлорида галлия в процессе осаждения P_{H_2O}/P_{GTAC} . При обратном смещении на ГП (для изотипного ГП "++" на GaN) сигнал фотоответа возрастал как в анизотипных, так и в изотипных ГП. Рост сигнала наблюдался с увеличением приложенного напряжения и достигал максимальных значений при $U \approx -(3-4) \text{ В}$. Максимальные значения фотосигнала анизотипных ГП отличались от значений при нулевом смещении не более чем в 2–5 раз (при различном содержании кислорода в пленках), в то

Фотоэлектрические параметры анизотипного и изотипного ГП Si/GaN(O)

Номер образца	$P_{\text{H}_2\text{O}}/P_{\text{ГТАС}}$	Тип ГП Si/GaN(O)	Сигнал фотоответа	
			U_{ph} , мВ ($U = 0$ В)	U_{ph} , мВ ($U = -3$ В)
1	0	<i>n-p</i>	13	38
		<i>p-p</i>	0.09	—
2	0.138	<i>n-p</i>	11	30
		<i>p-p</i>	0.062	50
3	0.150	<i>n-p</i>	50	40
		<i>p-p</i>	0.03	55
4	0.267	<i>n-p</i>	35	60
		<i>p-p</i>	0.26	65
5	0.464	<i>n-p</i>	32	75
		<i>p-p</i>	0.02	90
6	0.550	<i>n-p</i>	30	80
		<i>p-p</i>	0.058	150
7	0.725	<i>n-p</i>	0.12	50
		<i>p-p</i>	0.022	65

время как для изотипных ГП эти соотношения составляли 10^2-10^3 (см. таблицу). Кроме того, для изотипных ГП увеличение сигнала фотоответа (по отношению к сигналу при нулевом смещении) наблюдалось не только при обратном, но и при прямом смещении ("—" на GaN).

Спектральные характеристики анизотипных ГП, измеренные при нулевом смещении, (рис. 1) имеют типичный для гетеропереходов вид (аналогичные зависимости, измеренные в режиме фотоэдс, мы приводили для анизотипных ГП в [1]). Красная граница спектральной характеристики определяется шириной запрещенной зоны узкозонного полупроводника — Si. Коротковолновый спад fotocувствительности зависит от содержания кислорода и смещается в коротковолновую область с ростом концентрации кислорода в пленке. При обратном смещении вид спектральной характеристики анизотипных ГП практически не изменялся. Спектральные характеристики изотипных ГП при приложении обратного смещения обнаруживали изменения сигнала фотоответа только в коротковолновой части спектра. С увеличением содержания кислорода в пленке нитрида галлия токовая чувствительность в этой части спектра уменьшалась. Аналогичная картина наблюдалась и при приложении прямого смещения к изотипному ГП.

Измерение кинетики сигнала фотоответа анизотипного ГП показало, что изменение фотоотклика во времени t имеет дифференциальный вид, независим от содержания кислорода в пленке. В момент освещения гетероперехода ($t = 0$) величина фототока быстро нарастает, достигая максимальной величины. По достижении максимального значения сигнал медленно спадает. Постоянные времени быстрого и медленного процессов составляли $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ и $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ с соответственно. При выключении светового импульса наблюдается резкий выброс сигнала со

сменной знака и с последующей медленной релаксацией к нулевому значению. На рис. 2 представлены характерные временные зависимости релаксации фотоответа $U_{\text{ph}}(t)$ для анизотипного ГП при различных смещениях. При увеличении обратного смещения кривые фотоотклика сглаживаются и при $U \approx -(0.2-4)$ В становятся монотонными. При прямом смещении качественно кинетика фотоотклика не изменяется, при этом сохраняется и знак сигнала. Однако с увеличением прямого смещения немонотонность кривых релаксации возрастает, а сигнал фотоответа заметно уменьшается.

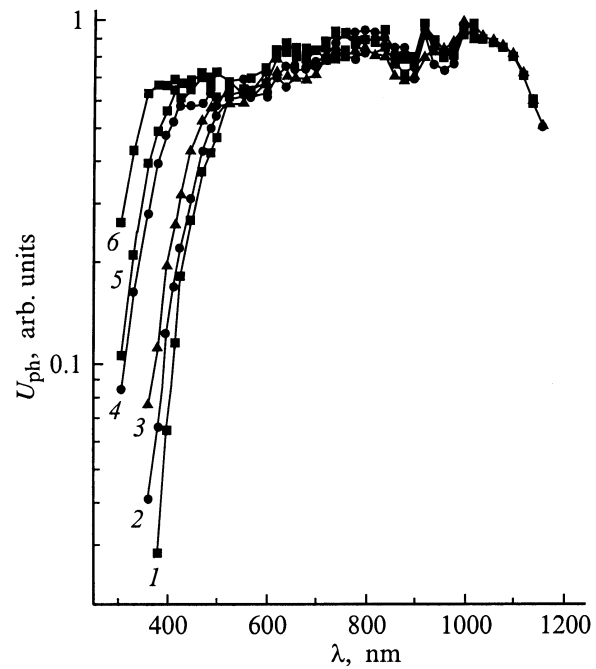


Рис. 1. Спектральные характеристики анизотипных гетеропереходов $n\text{-Si}/p\text{-GaN(O)}$, полученных при различных парциальных давлениях паров воды. $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_{\text{ГТАС}}$: 1 — 0, 2 — 0.150, 3 — 0.267, 4 — 0.464, 5 — 0.55, 6 — 0.725.

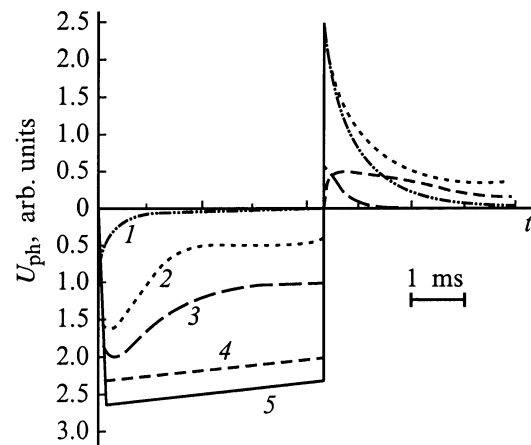


Рис. 2. Кинетика фотоотклика анизотипного гетероперехода $n\text{-Si}/p\text{-GaN(O)}$ при различных прямых (+) и обратных (–) смещениях. U , В: 1 — (+0.25), 2 — 0, 3 — (–0.1), 4 — (–0.2), 5 — (–3).

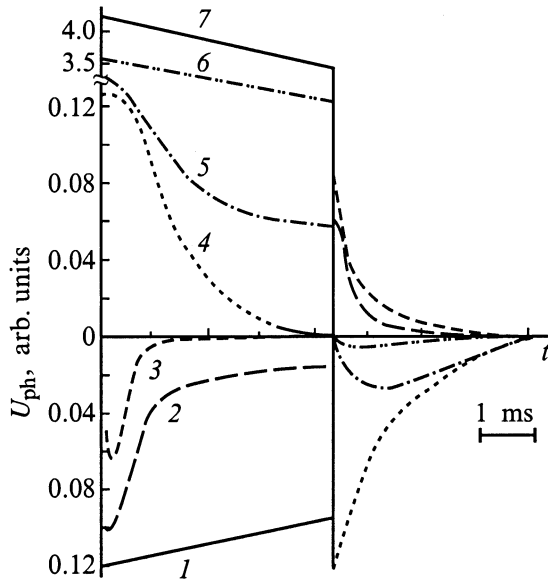


Рис. 3. Кинетика фотоотклика изотипного гетероперехода *p*-Si/*p*-GaN(O) при различных прямых (+) и обратных (-) смещениях. *U*, В: 1 — (-0.2), 2 — (-0.1), 3 — 0, 4 — (+0.1), 5 — (+0.2), 6 — (+0.4), 7 — (+3.5).

Дифференциальный вид релаксации сигнала фотоответа характерен и для изотипных ГП (рис. 3). Однако в отличие от ранее рассматриваемого случая кривые релаксации сглаживаются с увеличением как обратного, так и прямого смещения. Кроме того, знаки сигналов фотоотклика в режимах прямого и обратного смещения разные.

Все изотипные и анизотипные ГП обладают выпрямляющими свойствами [1]. Прямые ветви ВАХ *I*(*U*) анизотипных ГП (рис. 4, *a*) при малых смещениях описываются экспоненциальной зависимостью вида $I \propto \exp(eU/\beta kT)$ с $\beta = 2-3$. При более высоких напряжениях прямой ток $I \propto \exp(AU)$. Обратные ветви ВАХ (рис. 4, *b*) характеризуются степенной зависимостью тока от напряжения $I = A(T)U^m$.

Для изотипных гетеропереходов прямые и обратные токи описываются степенными зависимостями типа $I = A(T)U^m$. Наклон прямых ветвей в зависимости от напряжения изменяется от $m \approx 1.5$ при $U < 2$ В до $m \approx 2.5$ при более высоких напряжениях (рис. 5, *a*). В обратных ветвях также можно выделить два линейных участка, различающихся величинами наклона при малых и больших напряжениях смещения (рис. 5, *b*).

Для анализа механизмов формирования fotocувствительности были построены зонные диаграммы изучаемых ГП обоих типов. Поскольку сведения об электронном средстве оксинитрида галлия в литературе отсутствуют, основные параметры диаграмм — разрывы зон ΔE_c и ΔE_v — были определены по экспериментально найденным значениям диффузионных потенциалов V_{D1} , V_{D2} с учетом значений энергии Ферми и ширин запрещенных зон компонент гетероперехода. Диффузионные

потенциалы определялись по величине фотоэдс насыщения при освещении ГП импульсом света большой интенсивности и по ВАХ. На рис. 6, *a, b* представлены энергетические диаграммы ($T = 300$ К) изотипного и анизотипного гетеропереходов Si/GaN(O) с содержанием кислорода в широкозонном материале, соответствующим $P_{H_2O}/P_{GTAC} = 0.55$. На диаграммах значения ширин запрещенных зон кремния и оксинитрида галлия составляли $E_{g1} = 1.12$ эВ и $E_{g2} = 3.85$ эВ соответственно [1], $\Delta E_c = 2.75$ эВ, $\Delta E_v = 0.18$ эВ, $V_{D1} = 0.30$ эВ,

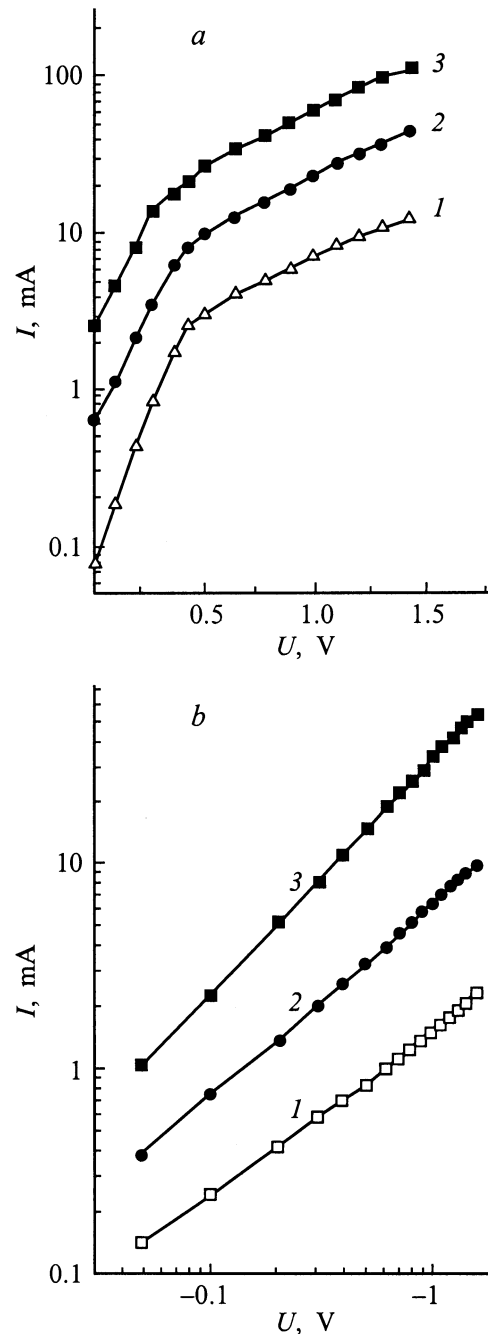


Рис. 4. Прямые (*a*) и обратные (*b*) ветви ВАХ анизотипного гетероперехода *n*-Si/*p*-GaN(O) при различных температурах *T*, К: 1 — 200, 2 — 250, 3 — 300.

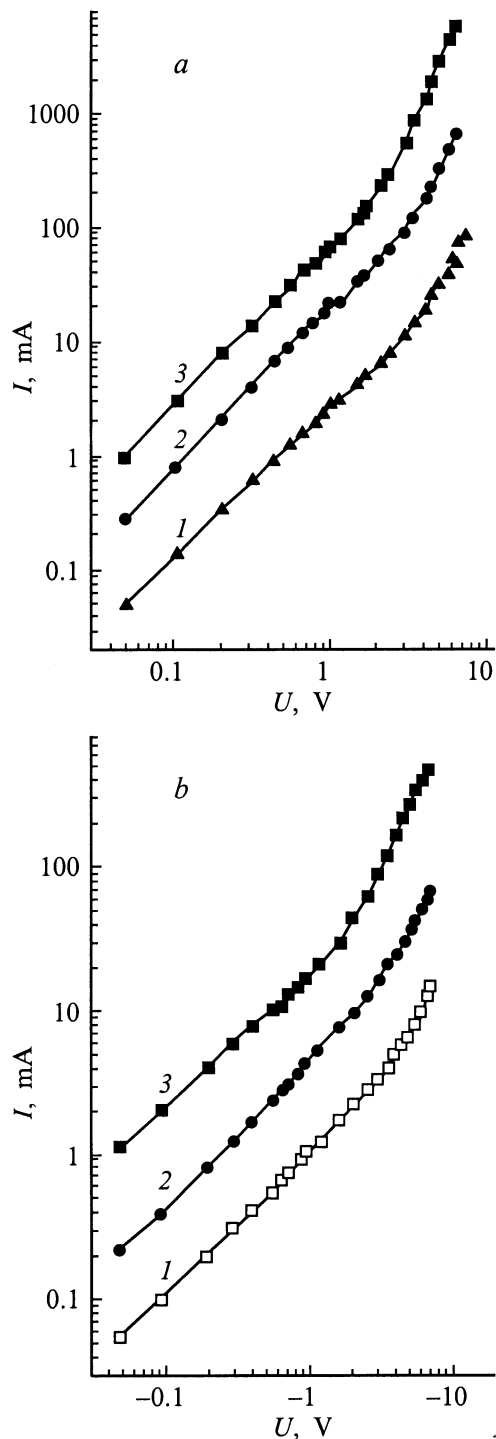


Рис. 5. Прямые (а) и обратные (б) ветви ВАХ изотипного гетероперехода $p\text{-Si}/p\text{-GaN}\langle\text{O}\rangle$ при различных температурах T , К: 1 — 150, 2 — 250, 3 — 300.

$V_{D2} = 0.11$ эВ для анизотипного ГП, $\Delta E_c = 2.92$ эВ, $\Delta E_v = 0.27$ эВ, $V_{D1} = 0.32$ эВ, $V_{D2} = 0.09$ эВ для изотипного ГП.

Особенностью гетеропереходов $\text{Si}/\text{GaN}\langle\text{O}\rangle$, как и многих реальных ГП с большим различием параметров кристаллических решеток, является большая концентра-

ция поверхностных состояний (ПС) на границе раздела кремний–(оксинитрид галлия). Оценка, учитывающая рассогласование параметров решеток обоих компонентов, дает в зависимости от содержания кислорода в пленке оксинитрида значения плотности поверхностных состояний $\sim 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Взаимодействуя с носителями тока, поверхностные состояния изменяют пространственное распределение заряда у границы раздела и тем самым влияют на характеристики неравновесных процессов [2]. На присутствие поверхностных состояний на границе $\text{Si}-\text{GaN}\langle\text{O}\rangle$ указывают результаты определения знака фотоэдс изотипного ГП. Разные знаки фотоэдс при возбуждении электронно-дырочных пар в кремнии (фотонами с энергией $E_{g1} < h\nu < E_{g2}$) и при создании пар в оксинитриде ($h\nu < E_{g2}$) говорит о том, что контактные электрические поля в этих полупроводниках направлены в разные стороны. Следовательно, поверхностные состояния изменяют области пространственного заряда в оксинитриде галлия и кремнии, образуя обедненные слои по обе стороны от границы раздела. О наличии ПС свидетельствует и величина коэффициента $\beta \approx 2$ в прямой ветви ВАХ анизотипного ГП $I \propto \exp(eU/\beta kT)$, указывающая на участие в токопрохождении процессов рекомбинации на границе ГП [2]. В анизотипных ГП поверхностные состояния перераспределяют диффузионные потенциалы между компонентами, увеличивая значения V_{D2} в сильно легированном оксинитриде (без учета ПС следует ожидать значений V_{D2} , значительно меньших по отношению к наблюдаемым в эксперименте, при существующем уровне концентраций носителей тока в $\text{GaN}\langle\text{O}\rangle$).

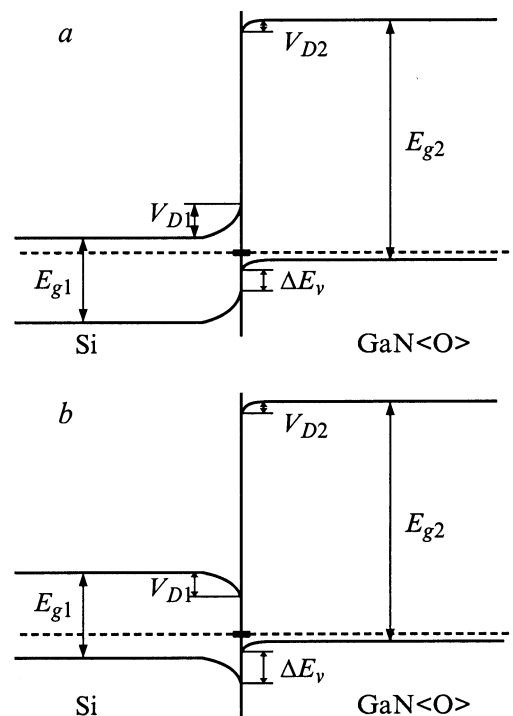


Рис. 6. Зонные диаграммы: а — анизотипный ГП $n\text{-Si}/p\text{-GaN}\langle\text{O}\rangle$; б — изотипный ГП $p\text{-Si}/p\text{-GaN}\langle\text{O}\rangle$

Рассмотрим полученные результаты с учетом влияния поверхностных состояний на границе гетероперехода. Это влияние особенно сильно сказывается на кинетике фотоотклика гетероперехода и формировании fotocувствительности.

Описывая картину фотоотклика анизотипного ГП, мы отмечали ее дифференциальный вид. Немонотонность кривых фотоотклика наблюдали ранее при изучении кинетики фотоответа анизотипных ГП n -Si/ p -PbS [3], изотипных ГП n -CdS/ n -CdSe [4] и других ГП [5–7]. При качественной схожести результатов такое поведение может иметь разную природу. В работе [3] дифференциальный вид кинетики фотоотклика связывается с диэлектрической прослойкой на границе компонент ГП. В теоретической работе [8] показано, что немонотонность кинетики фотоответа возможна при определенном соотношении параметров полупроводниковых материалов и емкостей областей обеднения у границы раздела ГП, причем такая ситуация возможна как в идеальном, так и в неидеальном ГП. Модель, предложенная в [5–7], объясняет немонотонный характер двумя конкурирующими процессами. Первый процесс связан с разделением неравновесных носителей в электрическом поле приграничного барьера и приводит к росту фотоотклика. Второй связан с перезарядкой граничных состояний. Спад величины фотоотклика объясняется захватом неравновесных носителей на ПС и их рекомбинацией. Смена знака фотоотклика при окончании светового импульса объясняется уходом заряда с ПС, при этом высота барьера уменьшается. Авторы [4], также связывая дифференциальный вид фотоотклика изотипного ГП n -CdS/ n -CdSe с ПС, приходят к выводу, что при освещении высота равновесного барьера (образованного захватом электронов на ПС) уменьшается, а не растет как в [5–7], что обусловлено накоплением фотодырок в приграничной потенциальной яме и рекомбинацией их с электронами на ПС. В результате рекомбинации и уменьшения высоты барьеров увеличивается поток фотоэлектронов на поверхностные состояния, и величина фотоотклика падает. После окончания освещения высота барьеров восстанавливается до равновесной величины за счет захвата электронов из объема на ПС.

Анализируя кинетику фотоответа в исследуемых нами ГП, приходим к выводу, что механизмы формирования fotocувствительности в изотипных и анизотипных ГП Si–GaN(O) — разные (несмотря на то, что области объемного заряда для обоих типов ГП определяются ПС). В изотипных ГП механизм формирования fotocувствительности связан с двумя конкурирующими процессами: разделением носителей в приграничном поле, обеспечивающем рост фототока, и перезарядкой ПС, приводящей к спаду фототока. Поскольку при освещении через широкозонный материал (GaN(O)) генерация неравновесных носителей в Si происходит на границе ГП, существует большая вероятность захвата фотоэлектронов на ПС с последующей рекомбинацией с дырками.

Эффективность разделения носителей возрастает с ростом внутреннего разгоняющего поля, которое растет с увеличением обратного смещения. При этом захват носителей и рекомбинация их на ПС уменьшается, в результате чего величина фотоотклика растет, а временная зависимость фотоотклика сглаживается, сохраняя максимальное значение в течение всего светового импульса. Однако увеличение смещения приводит к росту сигнала фотоответа всего в несколько раз.

В изотипных ГП, как и в анизотипных, кинетика релаксации фотоотклика имеет дифференциальный вид. Однако в кинетике изотипного ГП существует ряд особенностей. Во-первых, величины сигнала фотоотклика при нулевом смещении очень небольшие. Смещение, приложенное к ГП, как положительное, так и отрицательное, увеличивает сигнал фотоотклика. Во-вторых, фотоответ при прямом смещении на ГП имеет противоположный знак по отношению к знаку фотоответа при нулевом и обратном смещении. В-третьих, смещение, подаваемое на ГП, приводит к росту сигнала фототока на несколько порядков. Следует отметить, что разные знаки сигнала фотоотклика при прямом и обратном смещении и рост сигналов в обоих случаях является дополнительным аргументом в пользу того, что мы имеем дело с изотипным ГП, имеющим обедненные области по обе стороны от гетерограницы.

Сильный рост фотоотклика при приложении смещения нельзя объяснить только эффективностью разделения фотоносителей разгоняющим приграничным полем. Обнаруженный рост фотоотклика ГП с большой плотностью ПС при обеих полярностях смещения может быть обусловлен фототранзисторным эффектом. При освещении ГП неравновесные носители (электроны), возникающие в узкозонном полупроводнике, под действием приграничного поля попадают в яму. Накопление в приграничной области неосновных носителей тока, а также их рекомбинация с зарядом на ПС понижают высоту потенциального барьера. Это в свою очередь приводит к увеличению потока основных носителей через границу раздела ГП. Таким образом, изменение тока через ГП может во много раз превысить поток фотоносителей, непосредственно генерируемых излучением. Подобное увеличение fotocувствительности за счет модуляции сквозного тока наблюдалось в структурах n -CdS/ n -CdSe [4], n -Ge/ n -Si [9]. Следует отметить еще одну особенность на кривых фотоотклика изотипных ГП: сигнал фотоотклика при прямом и обратном смещении имеет разные знаки. Это объясняется тем, что при прямом и обратном смещении потоки основных носителей имеют разные направления. В результате при приложении смещения разного направления можно наблюдать смену знаков фотоотклика. Таким образом, формирование fotocувствительности в изотипных ГП благодаря механизму модуляции сквозного тока позволяет получить заметные сигналы фотоответа на структурах с большой плотностью ПС.

Список литературы

- [1] С.Е. Александров, Т.А. Гаврикова, В.А. Зыков. ФТП, **34**, 297 (2000).
- [2] А. Милнс, Д. Фойхт. *Гетеропереходы и переходы металл–полупроводник* (М., 1975).
- [3] Л.Г. Бакуева, В.И. Ильин, С.Ф. Мусихин, О.В. Рабизо, А.Я. Шик. ФТП, **16**, 1416 (1982).
- [4] М.Г. Ермаков, В.И. Поляков, П.И. Петров, М.И. Елинсон. ФТП, **18**, 115 (1984).
- [5] S.C. Dehlberg, W. Orr. Surf. Sci., **67**, 226 (1977).
- [6] S.C. Dehlberg, J.R. Chelikowsky, W.Orr. Phys. Rev. B, **15**, 3163 (1977).
- [7] A.J. Steckl, H. Elabd, K.Y. Tam, S.P. Sheu, M.E. Motabedi. IEEE Trans. El. Dev., **ED-27**, 126 (1980).
- [8] А.Я. Шик. ФТП, **16**, 1411 (1982).
- [9] S. Yawata, R.L. Anderson. Phys. St. Sol., **12**, 297 (1965).

Редактор Л.В. Шаронова

Specific features of photoelectric properties of anisotypic and isotypic Si/GaN(O) heterojunctions

S.E. Alexandrov, T.A. Gavrikova, V.A. Zykov

State Technical University,
195251 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of complex investigations of electrical and photoelectrical properties of isotypic p -Si/ p -GaN(O) and anisotypic n -Si/ p -GaN(O) heterojunctions are presented. Heterostructures were prepared by a chemical deposition of GaN(O) layers of p - or n -Si substrates using pyrolysis of gallium trichloride ammonia complexes in wet atmosphere. The integral and spectral photoresponses, the photoresponse kinetics when different direct and reverse biases are applied, as well as current–voltage characteristics and the saturation photovoltage were studied. It has been shown that in both types of heterojunctions the charge distributions at the interface are mainly determined by the charge binding at the boundary states, the density of which being estimated as $10^{14}–10^{15} \text{ cm}^{-2}$. This leads to forming the depletion layers on both sides of heterojunctions. Mechanisms of the photosensitivity formation in anisotypic and isotypic heterojunctions are analyzed. Differential types of photokinetics are shown to be related to the state recharging at the interface. A sharp increase in the photoresponse of an isotypic heterojunctions under biases is determined by a phototransistor effect. The energy band models of the heterojunction proposed makes it possible to explain adequately the observed effects.