Влияние встроенного квазиэлектрического поля в базовых AlGaAs-слоях импульсных высоковольтных $p-i-n$-диодов на динамику их обратного восстановления

© Ф.Ю. Солдатенков, Д.А. Малевский, М.М. Соболев, А.А. Усикова, А.С. Власов, А.А. Караваева

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

E-mail: f.soldatenkov@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 17 июня 2026 г.
Принята к публикации 25 июня 2026 г.

Приведены сравнительные характеристики обратного восстановления $p^+-p^0-i-n^0-n^+$-диодов с высоковольтными плавными p^0-i-n^0-переходами из GaAs и $Al_xGa_{1-x}As$ с x до 0.8, с градиентом состава базовых слоев и без него, изготовленными методом жидкофазной эпитаксии. Выявлено, что действие в базовых слабо легированных слоях $Al_xGa_{1-x}As$ дополнительного встроенного квазиэлектрического поля (до 10^4 эВ/м), появляющегося в результате создания градиента состава x (и ширины запрещенной зоны) по их толщине, способствует уменьшению времени релаксации неравновесных носителей заряда и, соответственно, времени обратного восстановления диодов на их основе.

Ключевые слова: AlGaAs, p^0-i-n^0-переход, встроенное квазиэлектрическое поле, обратное восстановление диода.

DOI: 10.61011/FTP.2026.06.63896.9757

1. Введение

Импульсные высоковольтные $p-i-n$-диоды на основе широкозонных слабо легированных AlGaAs-слоев могут использоваться в силовой электронике при работе на повышенных частотах повторения импульсов (МГц) и при повышенных температурах, $> 300\,^\circ$C [1–4].

Время обратного восстановления t_{rr} (время восстановления блокирующих свойств $p-n$-перехода при переключении диода из проводящего состояния в блокирующее) является одним из основных факторов, определяющих рабочую частоту диода. В течение этого времени рассасывается накопленный в базовых слоях заряд, что приводит к протеканию тока диода в обратном направлении. Конкретная форма зависимостей тока и напряжения от времени определяется распределением избыточных носителей в диоде и параметрами электрической цепи. При переключении диода с прямого напряжения на обратное существует две фазы восстановления обратного сопротивления — фаза постоянного обратного тока t_1 (на котором $p-n$-переход остается смещенным в прямом направлении, несмотря на изменение полярности приложенного к нему напряжения внешней цепи) и фаза восстановления обратного напряжения t_2 (на котором вблизи $p-n$-перехода образуется слой объемного заряда, который, расширяясь, блокирует приложенное к диоду напряжение).

При появлении в базовых слоях диода дополнительного квазиэлектрического поля (КЭП) длительности фаз обратного восстановления t_1 и t_2 изменяются, они сильно зависят от знака и величины КЭП, которое влияет на концентрацию носителей в базе [5,6]. Ускоряющее (тянущее) КЭП уменьшает эту концентрацию, а тормозящее КЭП увеличивает ее. Так как очевидно, что более высокая концентрация носителей заряда в $p-n$-переходе требует более длительного времени для их удаления, ускоряющее КЭП может значительно уменьшить длительность t_1, в то время как тормозящее КЭП увеличит его. Под действием ускоряющего КЭП длительность t_2 обычно увеличивается, так как на этой фазе переключения диода ускоряющее КЭП действует в направлении, противоположном диффузии носителей [6]. Тормозящее КЭП может значительно уменьшить длительность t_2. Отметим, что использование ускоряющего КЭП ведет к уменьшению величины заряда переключения по сравнению с диодом с однородной базой.

В данной работе рассмотрены особенности обратного восстановления импульсных высоковольтных $p-i-n$-диодов на основе гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$, с градиентом состава базовых слоев и, соответственно, с градиентом ширины запрещенной зоны (E_g), в сравнении с гомоэпитаксиальными структурами GaAs и гетероструктурами $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ с минимальным градиентом E_g.

2. Образцы и методика измерений

Высоковольтные $p^+-p^0-i-n^0-n^+$-диоды на основе гетероэпитаксиальных слоев $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ и гомоэпитаксиальных GaAs были изготовлены с помощью модифицированного метода жидкофазной эпитаксии [2,4,7] в графитовой кассете прокачного типа (AlGaAs) или кварцевом контейнере сливного типа (GaAs) в атмосфере водорода. Эпитаксиальное выращивание высоковольт-

ных слабо легированных плавных p^0-i-n^0-переходов твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$ или GaAs осуществляли на подложках p^+-GaAs (100), легированных цинком до концентрации $(1-5)\cdot 10^{18}$ см$^{-3}$, при принудительном охлаждении ограниченных растворов-расплавов Al–Ga–As или Ga–As в диапазоне температур от 900–850 до 750–700 °C (AlGaAs) или до комнатной температуры (GaAs). На втором этапе изготовления приборных структур на поверхности плавных p^0-i-n^0-переходов выращивали сильно легированные n^+-GaAs-эмиттерные слои с концентрацией свободных электронов $\sim 10^{18}$ см$^{-3}$.

В работе исследовались $p-i-n$-структуры на основе слабо легированных слоев GaAs и $Al_xGa_{1-x}As$, с содержанием x до 0.8, толщиной от 30 до 50 мкм, с градиентом состава базовых слоев и без него (рис. 1). Структуру p^0-i-n^0-перехода изготавливали методом жидкофазной эпитаксии из одного раствора-расплава за счет автолегирования фоновыми примесями. Одним из основных источников примесей, способных существенным образом повлиять на примесный фон растущих слоев, является Ga (99.9999 %), использующийся в качестве растворителя. В нем содержатся элементы — кремний (амфотерная примесь), селен, теллур (донорные примеси). В работе [4] приведены расчетные значения предельных концентраций этих химических элементов, встраивающихся в слои AlGaAs из раствора галлия. Методика изготовления плавных p^0-i-n^0-переходов используемым в работе способом изложена ранее в работах [2,4,7]. При таком подходе можно изменять концентрацию свободных носителей заряда и тип проводимости эпитаксиального слоя без непосредственного легирования, исключительно регулируя условия процесса выращивания, и, таким образом появляется возможность получать слои с $p-n$-переходом из одного раствора-расплава. На рис. 1 показано типичное распределение свободных носителей заряда (черные линии) по толщине плавных p^0-i-n^0-переходов $Al_xGa_{1-x}As$. Концентрацию носителей заряда определяли с помощью ртутного зонда по вольт-емкостным зависимостям обратно смещенного барьера Шоттки, и при послойном стравливании поверхности образцов получали распределение носителей по толщине структуры. Распределение содержания AlAs (X_{Al}) по толщине базовых слоев определяли по сколу с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (использовался лазер с длиной волны 532 нм).

Важной особенностью большинства изготовленных вышеописанным способом структур $Al_xGa_{1-x}As$ (с x до 0.45) является наличие в них градиента E_g, получаемого за счет уменьшения содержания алюминия в эпитаксиальных слоях от p^+-GaAs-подложки к n^+-GaAs-эмиттерному слою (рис. 1). При использованной в работе оснастке и в указанном температурном интервале роста структур градиент E_g обычно составлял величину ~ 0.01 эВ/мкм и, соответственно, величина встроенного квазиэлектрического поля при этом равнялась $\sim 10^4$ эВ/м. Структуры $Al_xGa_{1-x}As$ с x от 0.55 до 0.8

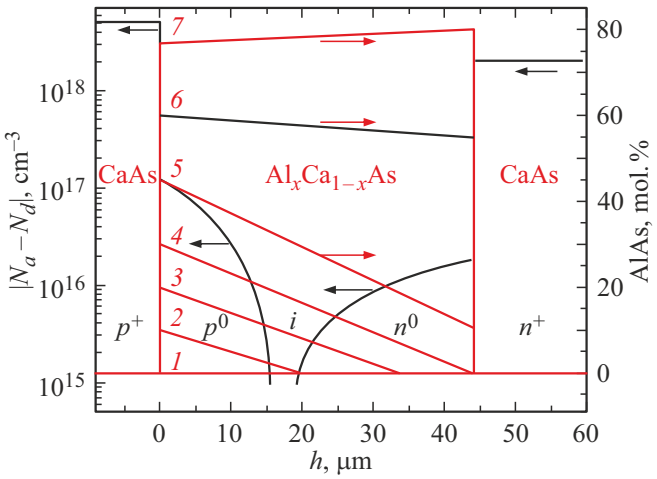


Рис. 1. Распределение свободных носителей заряда $|N_a-N_d|$ (черные линии) по толщине диодных структур p^+-GaAs (подложка)-$Al_xGa_{1-x}As$ (плавный p^0-i-n^0-переход)–n^+-GaAs (эмиттерный слой). Распределение содержания AlAs (состав x, красные линии) по толщине $p-i-n$-диодов с базовыми слоями GaAs (*1*) и $Al_xGa_{1-x}As$ с максимальным содержанием $x \sim 0.10$ (*2*), 0.2 (*3*), 0.3 (*4*), 0.45 (*5*), 0.6 (*6*), 0.8 (*7*).

были более однородными по составу и, соответственно, градиент E_g был минимален.

Из выращенных структур были изготовлены партии образцов (чипов). Образцы диодов имели форму мезаструктур, которые получали путем химического травления активных слоев до подложки. На p^+-GaAs-подложку наносили многослойный контакт NiCr–Ag–Au, а на n^+-GaAs-эмиттер — AuGe–Ni–Au. Площадь изготовленных образцов диодов составляла 0.5 мм^2.

Для изучения динамических характеристик переключения диодов в работе использовалась методика обратного восстановления диодов для случая прямоугольных импульсов напряжения (метод Лэкса, см. работы [5,6]). Время переключения диода из пропускного направления в блокирующее (время обратного восстановления) складывается из длительностей фаз высокой обратной проводимости t_1 (при этом наблюдается постоянство величины J_R) и спада обратного тока t_2. На рис. 2 в качестве примера показаны длительности фаз обратного восстановления t_1 и t_2 для образца *1*, с базовым слоем из GaAs. Для определения τ_{eff} образцы с помощью прижимного контакта помещались в 50-омный согласованный полосковый держатель; отношение амплитуд импульсов прямого J_F и обратного J_R токов поддерживалось $J_F/J_R \sim (5-6)$, при котором мы можем полагать, что длительность фазы $t_1 \approx \tau_{\text{eff}}$ [6].

3. Результаты и обсуждение

Были проведены исследования динамики обратного восстановления $p^+-p^0-i-n^0-n^+$-диодов на основе высоковольтных слабо легированных слоев из GaAs и

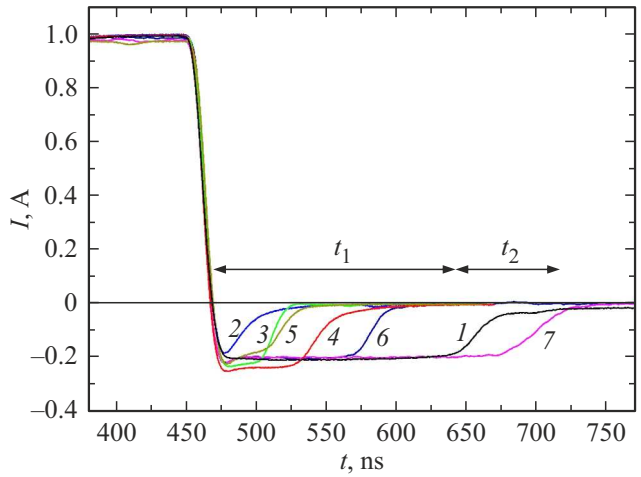


Рис. 2. Осциллограммы переключения $p-i-n$-диодов с базовыми слоями GaAs (*1*) и $Al_xGa_{1-x}As$ с максимальным содержанием $x \sim 0.10$ (*2*), 0.2 (*3*), 0.3 (*4*), 0.45 (*5*), 0.6 (*6*), 0.8 (*7*). Фазы обратного восстановления t_1 и t_2 указаны для структуры (*1*).

$Al_xGa_{1-x}As$ различного состава, с x до 0.8. Осциллограммы обратного восстановления диодов представлены на рис. 2. В диодах на основе слоев $Al_xGa_{1-x}As$ с максимальным содержанием x от 0.1 до 0.45, в сравнении с GaAs-диодами, эффективные времена неравновесных носителей заряда и, соответственно, времена обратного восстановления обычно оказываются меньше.

В целом при рассмотрении полученных результатов приходится учитывать много факторов, которые могут влиять на изменение величины времени обратного восстановления полученных диодов.

1. При выяснении причин изменения величин времени обратного восстановления, прежде всего, следует обратить внимание на наличие в исследуемых слоях дефектов с глубокими уровнями (ГУ), которые, как правило, определяют время жизни неосновных носителей заряда. Однако полученные ранее из вольт-емкостных измерений данные по дефектам с ГУ [2,4,8–13] в рассматриваемых слоях не позволяют непротиворечиво объяснить характер обратного восстановления диодов из структур твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$ разного состава. Ранее было выяснено, что в исследуемых $Al_xGa_{1-x}As$-слоях n-типа с $x \geq 0.21$ образуются DX-центры, связанные с фоновыми донорными примесями Si, Se и Te [2,4,9–13], обладающие бóльшими сечениями захвата носителей заряда, чем у дырочных ловушек *HL2* и *HL5* (связанных с вакансиями галлия), которые обычно определяют время релаксации неравновесных носителей заряда в слоях GaAs и твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ с относительно малым содержанием алюминия (при $x < 0.21$) [11]. Кроме того, в работе [11] было выяснено, что сечение захвата носителей DX-центров в слоях $Al_xGa_{1-x}As$ с увеличением состава x увеличивалось. Следовательно, с учетом того что концентрации дефектов с ГУ в слоях GaAs и $Al_xGa_{1-x}As$ с x до 0.6 приблизительно одинаковы, минимальное время обратного восстановления t_{rr} (ВОВ) должно было бы наблюдаться у диодов на основе слоя $Al_xGa_{1-x}As$ с $x \sim 0.6$ и $x \sim 0.8$, но в действительности этого не происходит: минимальные времена t_{rr} наблюдаются при переключении диодов на основе $Al_xGa_{1-x}As$ с $x < 0.21$, а максимальные — как у GaAs-диодов, так и у диодов на основе $Al_xGa_{1-x}As$ с $x \sim 0.6$ и $x \sim 0.8$.

2. Полученные результаты для образцов $Al_xGa_{1-x}As$ с градиентом состава x (см. рис. 1) логичней связать с действием дополнительного встроенного квазиэлектрического поля (КЭП), появляющегося в результате наличия градиента ширины запрещенной зоны (до 0.01 эВ/мкм) в базовых слоях, которое, по нашему мнению, оказывает решающее влияние на скорость релаксации неравновесных носителей заряда. Наибольшее быстродействие наблюдается для структуры *2*, в которой присутствует встроенное квазиэлектрическое поле (вызванное градиентом состава твердого раствора) только в p^0-области (частично включая i-область). Во всех остальных структурах градиент состава попадает в n^0-область, препятствуя, таким образом, дрейфу неравновесных дырок оттуда. В структуре *6* величина градиента состава минимальна, что наихудшим образом (среди структур *2*–*6*) сказывается на быстродействии. Времена обратного восстановления диодов на основе структур $Al_xGa_{1-x}As$ с x от 0.55 до 0.8 (см. рис. 2, структуры *6* и *7*) были сравнимы по величине с временами переключения GaAs-диодов и находились в диапазоне величин 140–260 нс, что может быть связано с практическим отсутствием градиента ширины запрещенной зоны в базовых слоях (см. рис. 1).

3. Необходимо учитывать влияние гетерограниц, а именно наличие или отсутствие разрывов зон в гетероструктурах. Как отмечается в работе [7], для получения приборов с быстрым переключением существенно пространственное ограничение только одного типа носителей, что реализуется, например, в гетероструктурах p-GaAs–p-$Al_xGa_{1-x}As$, в которых бóльшая часть разрывов зон на гетерогранице приходится на зону проводимости, и при $x \leq 0.15$ разрыв валентных зон $\Delta E_V \sim kT$. Этот случай реализован в гетероструктуре *2* со слоем $Al_xGa_{1-x}As$ с x до 0.1 (см. рис. 1 и 2), что также может позволить объяснить значительное уменьшение значений времени обратного восстановления именно для этой структуры. Кроме того, в непрямозонном AlGaAs (структуры *6* и *7*) эффективная масса электронов больше, чем в прямозонном, что может сказываться на увеличении времени обратного восстановления диодов на их основе.

4. Заключение

В настоящей работе с помощью метода обратного восстановления исследовались $p^+-p^0-i-n^0-n^+$-диоды с

высоковольтными плавными p^0-i-n^0-переходами GaAs и $Al_xGa_{1-x}As$ с x до 0.8, изготовленными методом жидкофазной эпитаксии. Было проведено сравнение характеристик переключения диодов с различными по составу базовыми слоями $Al_xGa_{1-x}As$ (с максимальным значением x от 0.1 до 0.45) с градиентом ширины запрещенной зоны $E_g \sim 0.01$ эВ/мкм и диодов с базовыми слоями постоянного состава (почти без градиента E_g) на основе GaAs и $Al_xGa_{1-x}As$ с x от 0.55 до 0.8. Выявлено, что создание градиента состава x (и, соответственно, E_g) по толщине базового слабо легированного слоя $Al_xGa_{1-x}As$ позволяет получать диоды с меньшими временами обратного восстановления. В результате создания градиента E_g в слое возникает встроенное квазиэлектрическое поле, которое является ускоряющим для неравновесных носителей заряда (электронов) в p^0-$Al_xGa_{1-x}As$ базовом слое. Быстрое движение электронов под действием поля меняет интенсивность их взаимодействия с глубокоуровневыми центрами (ловушками) — ускорение носителей при обратном восстановлении снижает время, необходимое для эмиссии захваченных электронов, что модулирует процесс рекомбинации. Уменьшению времени обратного восстановления в структуре с базовым слоем $Al_xGa_{1-x}As$ с x до 0.1 может также способствовать пространственное ограничение только одного типа носителей, из-за наличия разрывов зон на гетерогранице, преимущественно приходящихся на зону проводимости. Таким образом, под действием встроенного квазиэлектрического поля, благодаря ускоренному выходу электронов из базы и их быстрой рекомбинации, время обратного восстановления t_{rr} диода уменьшается, повышая его частотные характеристики.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, В.И. Корольков, Д.Н. Третьяков, В.М. Тучкевич. ФТП, **1** (10), 1579 (1967).

[2] M.M. Sobolev, F.Y. Soldatenkov, V.G. Danil'chenko. J. Appl. Phys., **128** (9), 095705 (2020). DOI: 10.1063/5.0018317

[3] F.Yu. Soldatenkov, A.A. Pugovkin, A.E. Ivanov, D.A. Malevskiy, S.V. Levin. St. Petersburg State Polytech. Univ. J.: Phys. Math., **18** (1.1), 140 (2025). DOI: 10.18721/JPM.181.124

[4] М.М. Соболев, Ф.Ю. Солдатенков. ФТП, **54** (10), 1072 (2020). DOI: 10.21883/FTP.2020.10.49945.9419

[5] С.А. Ерёмин, Д.К. Мокеев, Ю.Р. Носов. *Полупроводниковые диоды с накоплением заряда и их применение* (М., Сов. радио, 1966) с. 153.

[6] Ю.Р. Носов. *Физические основы работы полупроводниковых диодов в импульсном режиме* (М., Наука, 1968) с. 263.

[7] В.Г. Данильченко, В.И. Корольков, Ф.Ю. Солдатенков. ФТП, **43** (8), 1093 (2009).

[8] B. Lax, S.F. Neustadter. J. Appl. Phys., **25** (9), 1148 (1954).

[9] М.М. Соболев, Ф.Ю. Солдатенков. ФТП, **57** (8), 644 (2023). DOI: 10.61011/FTP.2023.08.56961.5131C

[10] Ф.Ю. Солдатенков, М.М. Соболев, А.С. Власов, А.В. Рожков. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **7**, 19 (2024). DOI: 10.31857/S1028096024070037

[11] М.М. Соболев, Ф.Ю. Солдатенков. ФТП, **59** (3), 165 (2025). DOI: 10.61011/FTP.2025.03.61096.8179

[12] D.J. Chadi, K.J. Chang. Phys. Rev. B, **39**, 10063 (1989). DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.10063

[13] D.V. Lang, R.A. Logan, M. Jaros. Phys. Rev. B, **19**, 1015 (1979). DOI: 10.1103/PhysRevB.19.1015

Редактор А.Н. Смирнов

The effect of the intrinsic quasi-electric field in the base AlGaAs layers of pulsed high-voltage $p-i-n$ diodes on the dynamics of their reverse recovery

F.Yu. Soldatenkov, D.A. Malevskiy, M.M. Sobolev, A.A. Usikova, A.S. Vlasov, A.A. Karavaeva

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Comparative characteristics of reverse recovery are presented for $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ diodes with high–voltage gradual p^0-i-n^0 junctions from GaAs and $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0-0.8$), with and without a gradient in the composition of the base layers, produced by liquid-phase epitaxy. It has been revealed that the effect of an additional intrinsic quasi-electric field (up to 10^4 eV/m) in the base low-doped $Al_xGa_{1-x}As$ layers, resulting from the creation of a gradient of composition x (and band gap) in their thickness, reduces the relaxation time of nonequilibrium carriers and, accordingly, the time of reverse recovery of diodes based on them.