

08

Метастабильные состояния электронной подсистемы гетероструктур GaAs/Al_xGa_{1-x}As с квантовыми ямами, применяемых для создания детекторов дальнего инфракрасного диапазона

© С.А. Колосов, В.С. Кривобок, Д.А. Пашкеев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
E-mail: krivobok@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 28 августа 2024 г.

В окончательной редакции 6 октября 2024 г.

Принято к публикации 10 октября 2024 г.

Обнаружена метастабильная перестройка транспортных свойств и фотоотклика в дальнем ИК-диапазоне для гетероструктуры GaAs/Al_xGa_{1-x}As с легированными кремнием квантовыми ямами при их кратковременном освещении излучением ближнего ИК-диапазона. Показано, что данный эффект связан с кремниевыми DX-центрами, формирующимися в окрестности интерфейсов GaAs/Al_xGa_{1-x}As.

Ключевые слова: ИК-детектор, квантовая яма, DX-центр, молекулярно-лучевая эпитаксия.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.03.59823.20095

Полупроводниковые гетероструктуры (ГС) с квантовыми ямами (КЯ) GaAs/Al_xGa_{1-x}As используются при создании фотоприемных устройств (ФПУ), в том числе матричного типа, для средневолновой и длинноволновой областей инфракрасного (ИК) спектра излучения [1–3]. Детектирование фотона происходит за счет перехода электрона с основного квантово-размерного уровня (E_{1e}) на первый возбужденный уровень (E_{2e}), расположенный вблизи дна зоны проводимости барьера, и дальнейшего его дрейфа во внешнем электрическом поле [3]. Для заполнения уровня E_{1e} электронами обычно используется селективное легирование КЯ GaAs кремнием ввиду технологического удобства этой примеси для системы GaAs/Al_xGa_{1-x}As. В настоящей работе продемонстрировано, что при определенных условиях примесь кремния может формировать метастабильные состояния вблизи интерфейсов КЯ GaAs, которые приводят к появлению аномальных (метастабильных) перестроек фотоотклика в дальнем ИК-диапазоне. Обнаруженный эффект может оказаться значимым для широкого спектра приложений, использующих ГС GaAs/Al_xGa_{1-x}As при криогенных температурах.

Обсуждаемая в настоящей работе ГС GaAs/Al_xGa_{1-x}As ($x = 0.27$) с КЯ была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующих подложках GaAs (100) при температуре 620°C. Толщина барьеров Al_xGa_{1-x}As составляла 50 nm, толщина КЯ GaAs — 5.5 nm. В центре каждой КЯ был размещен δ -слой кремния с концентрацией $1.5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. Для реализации верхнего и нижнего контактов в структуре были предусмотрены слои GaAs толщиной до 200 nm, легированные кремнием до 10^{17} cm^{-3} . Детали роста описаны в работе [4]. Соответствие параметров ГС номинально заложенным было подтверждено с помощью рентгеноструктурного анализа. Одноэлектронный

спектр КЯ был оценен на основе измерений спектров люминесценции и спектров возбуждения фотолюминесценции. В частности, расстояние между уровнями E_{2e} и E_{1e} составило 145 meV, что приблизительно соответствовало максимуму фотоотклика фоточувствительного элемента (ФЭ) на длине волны $\sim 8.6 \mu\text{m}$, изготовленного с использованием полученной ГС. Размер ФЭ составлял $2 \times 1 \text{ mm}$. Измерения спектров стационарной фотопроводимости ФЭ проводились при температурах 67–300 K с использованием решетчатого монохроматора, оснащенного глобаром [5].

Появление метастабильной компоненты в проводимости ГС иллюстрирует рис. 1, а. При охлаждении ФЭ в темноте до температуры 67 K темновой ток через него составляет $11.6 \mu\text{A}$ при напряжении 0.25 V. Освещение ФЭ излучением низкой интенсивности с длиной волны $\lambda_i = 700 \text{ nm}$ в течение 500 s приводит к постепенному увеличению тока через образец до $32.6 \mu\text{A}$ (при дальнейшем облучении рост продолжался и сигнал постепенно насыщался). Затем, после выключения освещения, ток через ФЭ экспоненциально затухает до $\sim 25 \mu\text{A}$ и далее сохраняется практически неизменным более двух часов. При $\lambda_i > 1000 \text{ nm}$ сохраняющаяся компонента темнового тока практически не регистрируется и появляется при $\lambda_i \sim 950 \text{ nm}$ (рис. 1, б). Чтобы подавить стимулированный подсветкой дополнительный темновой ток, ФЭ необходимо нагреть и затем снова охладить. Пример соответствующих температурных зависимостей сопротивления показан на рис. 1, в. Отметим, что как при нагреве, так и при охлаждении энергия активации, вычисленная по наклону температурных зависимостей сопротивления в интервале 90–115 K, имеет одинаковую величину $\sim 145 \text{ meV}$, которая совпадает с энергией перехода $E_{1e} - E_{2e}$ в КЯ. В то же время при температурах, меньших 90 K, сопротивление ФЭ в темноте зависит от предыстории.

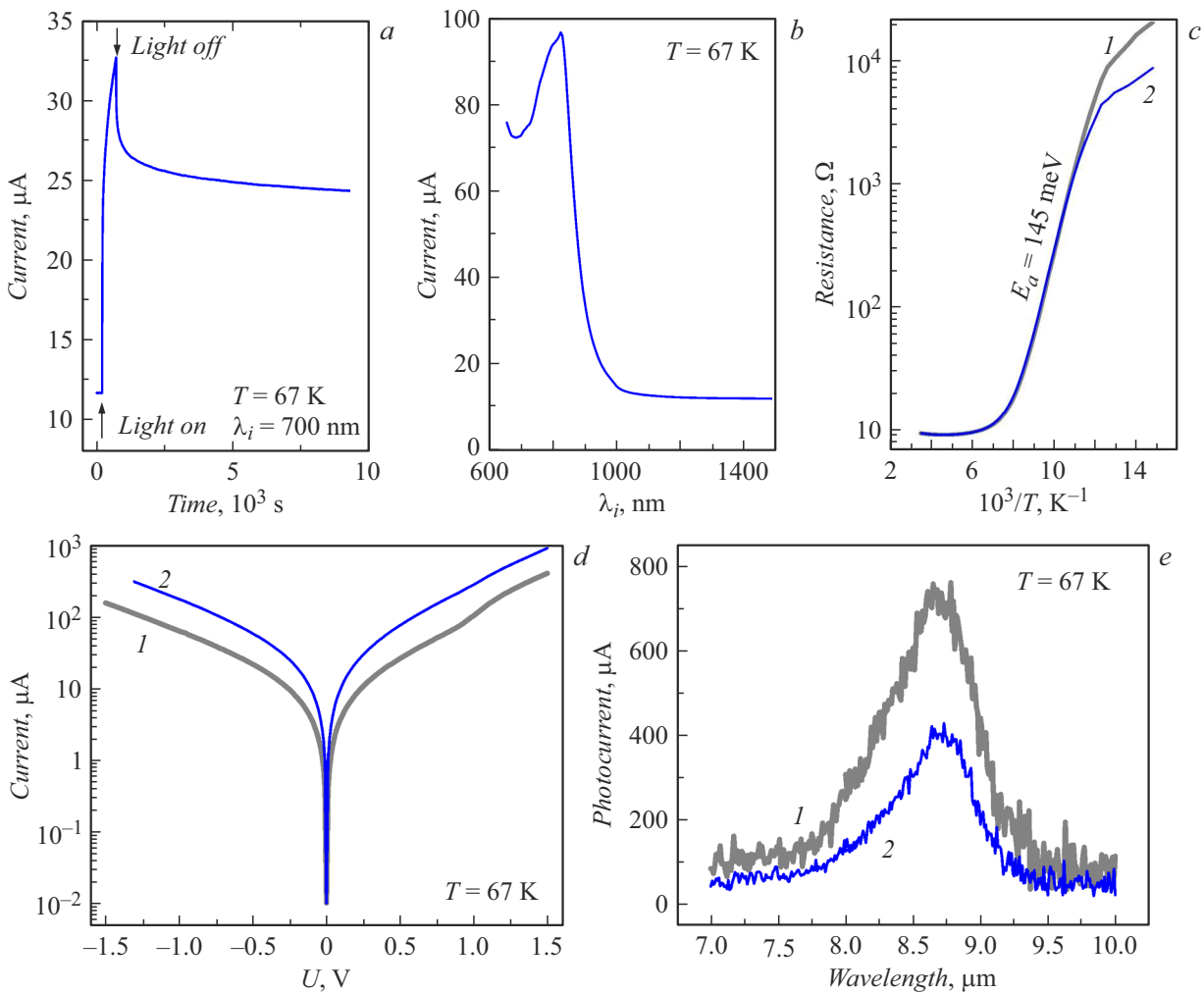


Рис. 1. *a* — появление метастабильной компоненты в проводимости ГС при ее облучении светом низкой интенсивности с $\lambda_i = 700$ nm в течение 500 s. $T = 67$ K. *b* — зависимость незатухающего фототока от λ_i при $T = 67$ K. *c* — температурные зависимости сопротивления ФЭ при его охлаждении в темноте (1) и нагреве изначально холодного ФЭ, облученного светом с $\lambda_i = 700$ nm (2). Падение напряжения на образце $U = 0.25$ V. *d* — вольт-амперные характеристики ФЭ, полученные после его охлаждения до $T = 67$ K в темноте (1) и последующего облучения светом с $\lambda_i = 700$ nm (2). *e* — спектры фотопроводимости ФЭ, полученные после его охлаждения до $T = 67$ K в темноте (1) и последующего облучения светом с $\lambda_i = 700$ nm (2).

Рассмотрим влияние описанных выше метастабильных эффектов на вольт-амперные характеристики (рис. 1, *d*) и спектр фотоотклика в дальнем ИК-диапазоне (рис. 1, *e*) при температуре 67 K. На рис. 1, *d* кривая 1 получена до освещения ФЭ, кривая 2 — после освещения ФЭ излучением с $\lambda_i = 700$ nm. Как видно из рисунка, подсветка оказывает существенное влияние на величину проводимости, но вид вольт-амперных характеристик при этом существенно не изменяется. Также существенно не меняется форма спектров фотопроводимости в дальнем ИК-диапазоне (рис. 1, *e*), но регистрируется заметное (приблизительно вдвое) уменьшение сигнала.

Описанная выше перестройка транспортных свойств ГС, вызванная воздействием коротковолновой подсветки, качественно напоминает явления, связанные с формированием в твердых растворах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ так называемых *DX*-центров. Данные центры возникают в ре-

зультате захвата нейтральным донором дополнительного электрона, сопровождающегося релаксацией решетки и формированием глубокой ловушки [6]. Отметим, что примесь кремния формирует в твердых растворах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ стабильный *DX*-центр при $x > 0.22$ [6]. Незатухающая составляющая фототока вызвана фотоионизацией *DX*-центров: $\text{DX} + \hbar\omega \rightarrow \text{Si}_{\text{Ga}}^+ + 2e^-$, где Si_{Ga}^+ — положительно заряженный донор кремния, e^- — свободный электрон. При этом обратный захват электрона требует преодоления высокого потенциального барьера, что и определяет метастабильный характер возникающих состояний. Как видно из рис. 1, *b*, пороговая длина волны, при которой уверенно регистрируется незатухающий фотоотклик, составляет $\lambda_i \sim 950$ nm. Это соответствует энергии оптической ионизации именно кремниевых *DX*-центров [6].

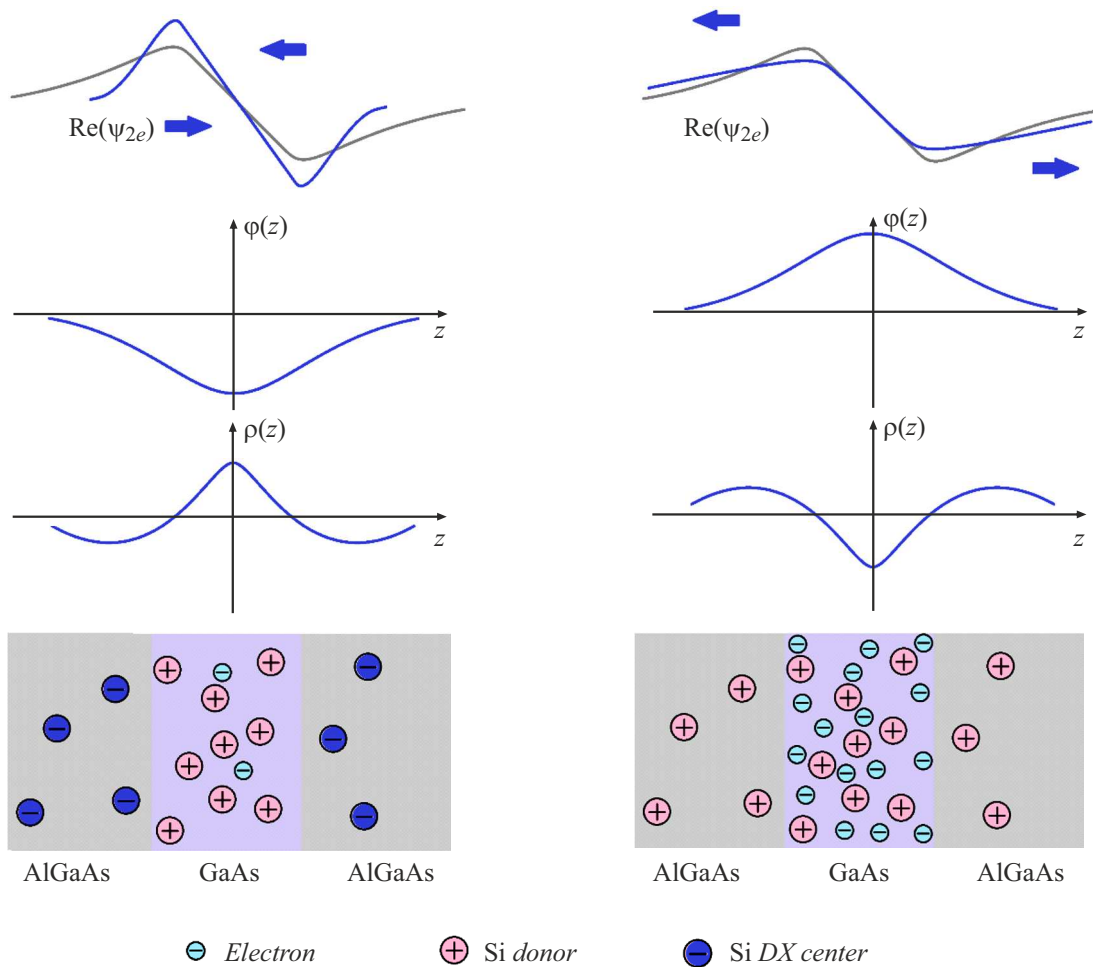


Рис. 2. Схематическая иллюстрация перестройки электронной подсистемы КЯ GaAs и волновой функции ψ_{2e} E_{2e} -состояния в результате фотоионизации DX -центров, расположенных в слоях $Al_xGa_{1-x}As$ рядом с КЯ GaAs. Представлены распределение заряда $\rho(z)$, потенциал $\varphi(z)$ и связанные с ним изменения волновой функции ψ_{2e} до фотоионизации DX -центров (слева) и после их фотоионизации (справа).

В КЯ GaAs сдвиг основного состояния относительно зоны проводимости GaAs не превышает 90 meV (это следует, в частности, из положения линии люминесценции КЯ, которая при температуре 5 К расположена в районе 1.61 eV). Данный сдвиг недостаточен для образования DX -центров непосредственно в КЯ GaAs [6]. В то же время при температуре роста 893 К часть атомов кремния диффундирует в барьерные слои $Al_xGa_{1-x}As$, в которых DX -центр стабилен по отношению к мелким донорным состояниям, в том числе расположенным в КЯ GaAs. Последнее определяется тем, что при $x = 0.27$ уровень, формируемый DX -центром, расположен ниже дна зоны проводимости GaAs [6]. Простые оценки показывают, что при температуре роста 893 К и времени роста 10 h значительная доля $\alpha \sim 0.2-0.4$ доноров диффундирует за пределы КЯ [7] (данный эффект сильнее выражен для нижних КЯ за счет их более длительного нахождения при высокой температуре роста). Это означает, что количество электронов должно увеличиваться в $(1-2\alpha)^{-1} \sim 2-5$ раз после подсветки. Эта оценка

качественно согласуется с увеличением фототока на рис. 1, *a, b*. Изложенное выше полностью объясняет изменения транспортных свойств ГС, представленные на рис. 1, *a-d*. В то же время неожиданным результатом остается перестройка фотоотклика, представленная на рис. 1, *e*. Вследствие ионизации DX -центра количество электронов в КЯ увеличивается, что должно было бы приводить к пропорциональному увеличению сигнала фотопроводимости. Однако кривая 2 на рис. 1, *e* свидетельствует об обратном эффекте. Такое поведение, указывающее на резкое уменьшение сечения поглощения света при переходе $E_{1e}-E_{2e}$, требует отдельного обсуждения.

В ФПУ на основе GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ уровень E_{2e} расположен вблизи края непрерывного спектра, и, как следствие, волновая функция расположенного на нем электрона должна быть чувствительна к слабому дополнительному потенциалу $\varphi(z)$: притягивающий характер $\varphi(z)$ способствует сжатию состояния вдоль оси z , перпендикулярной плоскости КЯ. В свою очередь

отталкивающий характер $\varphi(z)$ приводит к резкому расширению состояния или его переходу в непрерывный спектр. Данное поведение качественно отличает первое возбужденное состояние E_{2e} от основного E_{1e} , волновая функция которого локализована в пределах КЯ и практически не чувствительна к дополнительным возмущениям. Поскольку вероятность оптического перехода $E_{1e}-E_{2e}$ определяется в том числе перекрытием соответствующих волновых функций, следует ожидать, что сечение поглощения КЯ также будет чувствительно к сравнительно слабому $\varphi(z)$, размывающему или, наоборот, локализирующему состоянию E_{2e} .

В исследуемой ГС дополнительный потенциал $\varphi(z)$ неизбежно возникает из-за электронов и перезаряжающихся примесей, находящихся в КЯ или ее окрестностях. Связанное с ними распределение заряда $\rho(z)$ резко перестраивается при ионизации $DХ$ -центров, расположенных в окрестности КЯ, что в соответствии с уравнением Пуассона сопровождается качественными изменениями $\varphi(z)$. Схематически данный процесс показан на рис. 2. При охлаждении ФЭ в темноте примеси кремния в окрестности КЯ заряжены отрицательно (основное состояние системы), а КЯ за счет ухода части электронов имеет положительный заряд. В этом случае кулоновское взаимодействие формирует притягивающий потенциал для электронов с минимумом в центре КЯ (см. левую часть схемы на рис. 2). После подсветки КЯ излучением ближнего ИК-диапазона кремниевые $DХ$ -центры ионизируются, отдавая в КЯ по два электрона каждый. В результате формируется метастабильное состояние системы. Перетекание электронов способствует накоплению в КЯ избыточного отрицательного заряда (см. правую часть схемы на рис. 2), и, как следствие, формируется отталкивающий потенциал для электронов с максимумом в центре КЯ. В результате до подсветки состояние E_{2e} оказывается сжатым за счет наличия отрицательного заряда вокруг КЯ, и сечение поглощения возрастает. После подсветки вокруг КЯ появляется положительный заряд, который размывает состояние E_{2e} , и сечение поглощения резко уменьшается. Отметим, что значимость описанного выше эффекта зависит от деталей строения КЯ, в частности от точной глубины залегания уровня E_{2e} по отношению ко дну зоны проводимости $Al_xGa_{1-x}As$. Тем не менее во всех случаях диссоциация $DХ$ -центров в слоях $Al_xGa_{1-x}As$ будет уменьшать вероятность перехода $E_{1e}-E_{2e}$. Наиболее значимых изменений следует ожидать, если вызванная подсветкой перезарядка приведет к выталкиванию E_{2e} в непрерывный спектр.

Таким образом, в ГС $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ с легированными кремнием КЯ обнаружена метастабильная перестройка электронной подсистемы, вызванная подсветкой с длиной волны, не превышающей 950 nm. Данная перестройка сводится к увеличению фоновой проводимости ГС и падению фотоотклика в дальнем ИК-диапазоне. Показано, что обнаруженный эффект определяется кремниевыми $DХ$ -центрами, формирующимися в окрестности

интерфейсов $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ и влияющими на распределение заряда в КЯ и ее окрестностях. Обнаруженные метастабильные состояния, возникающие при подсветке ГС излучением ближнего ИК-диапазона, могут приводить к искажениям изображений, получаемых с помощью стандартных матричных ФПУ на основе ГС $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$, особенно с учетом того факта, что подложка $GaAs$ прозрачна для излучения с длиной волны ~ 950 nm.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-79-30086).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] F. Jiang, M. Shi, J. Zhou, Y. Bu, J.-P. Ao, X.S. Chen, *Adv. Photon. Res.*, **2** (9), 2000187 (2021). DOI: 10.1002/adpr.202000187
- [2] R. Ivanov, D. Visser, S. Smuk, S. Högnadóttir, L. Höglund, L. Bendrot, T. Kohl, L. Žurauskaitė, D. Evans, D. Rihtnesberg, D.G. Buldu, A. Smuk, S. Sehlin, S. Almqvist, M. Englund, P. Tinghag, E. Costard, *Proc. SPIE*, **13046**, 1304615 (2024). DOI: 10.1117/12.3016057
- [3] Н.А. Кульчицкий, А.В. Наумов, В.В. Старцев, *Фотоника*, **16** (1), 22 (2022). DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.1.22.36
- [4] В.С. Кривобок, Д.А. Пашкеев, Д.А. Литвинов, Л.Н. Григорьева, С.А. Колосов, Письма в ЖТФ, **46** (6), 3 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.06.49155.18130 [V.S. Krivobok, D.A. Pashkeev, D.A. Litvinov, L.N. Grigor'eva, S.A. Kolosov, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (3), 256 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020030256].
- [5] В.С. Кривобок, А.Д. Кондорский, Д.А. Пашкеев, Е.А. Екимов, А.Д. Шабрин, Д.А. Литвинов, Л.Н. Григорьева, С.А. Колосов, М.А. Чернопицкий, А.В. Клековкин, П.А. Форш, Письма в ЖТФ, **47** (8), 33 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.08.50851.18656 [V.S. Krivobok, A.D. Kondorskiy, D.A. Pashkeev, E.A. Ekimov, A.D. Shabrin, D.A. Litvinov, L.N. Grigoreva, S.A. Kolosov, M.A. Chernopitssky, A.V. Klekovkin, P.A. Forsh, *Tech. Phys. Lett.*, **47**, 388 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021040210].
- [6] P.M. Mooney, *Rad. Eff. Def. Solids*, **111-112** (1-2), 281 (1989). DOI: 10.1080/10420158908213003
- [7] E.F. Schubert, J.B. Stark, T.H. Chiu, B. Tell, *Appl. Phys. Lett.*, **53** (4), 293 (1988). DOI: 10.1063/1.99917