

Аккумуляция основных носителей заряда в слоях GaAs, содержащих наноразмерные кластеры мышьяка

© П.Н. Брунков[†], В.В. Чалдышев, А.В. Черниговский, А.А. Суворова, Н.А. Берт, С.Г. Конников, В.В. Преображенский*, М.А. Путьато*, Б.Р. Семягин*

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

* Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 29 февраля 2000 г. Принята к печати 1 марта 2000 г.)

С помощью вольтёмкостных исследований выявлена аккумуляция электронов и дырок в слоях GaAs, содержащих кластеры мышьяка и помещенных между буферными слоями GaAs *n*- и *p*-типа. В результате аккумуляции основных носителей заряда в прилегающих буферных слоях формируются обширные области обеднения. Моделирование вольтёмкостных характеристик, основанное на численном решении уравнения Пуассона, показало, что концентрация аккумулярованных зарядов составляет $\sim 1 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$, что сравнимо с концентрацией наноразмерных кластеров As, определенной методом просвечивающей электронной микроскопии.

Введение

Арсенид галлия, содержащий нанокластеры мышьяка, (*LT*-GaAs) привлекает большое внимание благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокое удельное электрическое сопротивление и фемтосекундные времена жизни неравновесных носителей заряда [1–4]. Несмотря на то что этот материал уже нашел целый ряд приборных применений (см., например, [5]), природа его электронных свойств до сих пор является предметом дискуссии. В частности, до сих пор остается неясным точное энергетическое положение и параметры локальных уровней, создаваемых кластерами As в запрещенной зоне GaAs. Наличие большой концентрации локальных состояний, обеспечивающих устойчивое закрепление уровня Ферми в глубине запрещенной зоны и быструю рекомбинацию неравновесных носителей, является главной особенностью *LT*-GaAs, отличающей этот материал от обычного полуизолирующего или высокоомного GaAs. В наших предыдущих работах [6,7] показано, что слой *LT*-GaAs, содержащий кластеры мышьяка, может аккумулятировать электроны из прилегающих слоев *n*-GaAs, в которых индуцируются области пространственного заряда. Распределение заряда в структуре *LT*-GaAs/*n*-GaAs подобно асимметричному *p*–*n*-переходу, в котором *LT*-GaAs играет роль сильно легированной глубокими акцепторами *p*-области.

В данной работе представлены результаты вольтёмкостных (*CV*) исследований структур с барьером Шоттки, где слой *LT*-GaAs, содержащий кластеры As, был вставлен между слоями GaAs *p*-типа проводимости. Проведено сравнение таких характеристик с соответствующими характеристиками для структур *n*-типа. Показано, что в обоих типах структур слой *LT*-GaAs аккумулятирует основные носители заряда.

Образцы и методика эксперимента

Образцы *n*- и *p*-типа проводимости (далее в тексте *N* и *P*-структуры) были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии в двухкамерной установке "Катунь" на подложках *n*⁺- и *p*⁺-GaAs (100) соответственно. *N*-структура состояла из трех слоев: слоя *n*-GaAs толщиной ~ 0.5 мкм (температура эпитаксии $T_s = 580^\circ\text{C}$), слоя *LT*-GaAs толщиной ~ 0.1 мкм ($T_s = 200^\circ\text{C}$) и второго слоя *n*-GaAs толщиной ~ 0.5 мкм ($T_s = 580^\circ\text{C}$). Эпитаксиальные слои *N*-структуры были однородно легированы Si с концентрацией $\approx 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

В случае *P*-структуры на *p*⁺-подложке выращивался буферный слой GaAs, сильно легированный бериллием, затем слой *p*-GaAs толщиной ~ 0.5 мкм (концентрация Be $\approx 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $T_s = 580^\circ\text{C}$), затем слой *LT*-GaAs толщиной ~ 0.1 мкм ($T_s = 200^\circ\text{C}$), затем слой *p*-GaAs толщиной ~ 0.5 мкм (концентрация Be $\approx 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $T_s = 580^\circ\text{C}$) и, наконец, на поверхности *P*-структуры выращивалась короткопериодная сверхрешетка GaAs/AlAs (1 нм/нм) общей толщиной 38 нм.

Низкая температура эпитаксии слоев *LT*-GaAs обеспечивала избыток мышьяка в таких слоях в количестве ~ 0.5 ат% [4]. Выращивание верхних слоев структур при высокой температуре в течение 0.5 ч приводило к преципитации избыточного мышьяка и формированию в слое *LT*-GaAs системы наноразмерных кластеров мышьяка. Исследования кристаллической структуры образцов, пространственного расположения, концентрации и размеров кластеров проводились методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в поперечном сечении и в плоскости роста. Использовался электронный микроскоп Philips EM 420 с ускоряющим напряжением 100 кэВ.

Барьеры Шоттки формировались путем напыления Au на поверхность образцов с диаметром 0.4 и 0.5 мм для *N*- и *P*-структур соответственно. Для создания омических контактов к *n*⁺-подложке использовался сплав AuGe, а к

[†] Факс: (812)2471017
E-mail: brunkov@pop.ioffe.rssi.ru

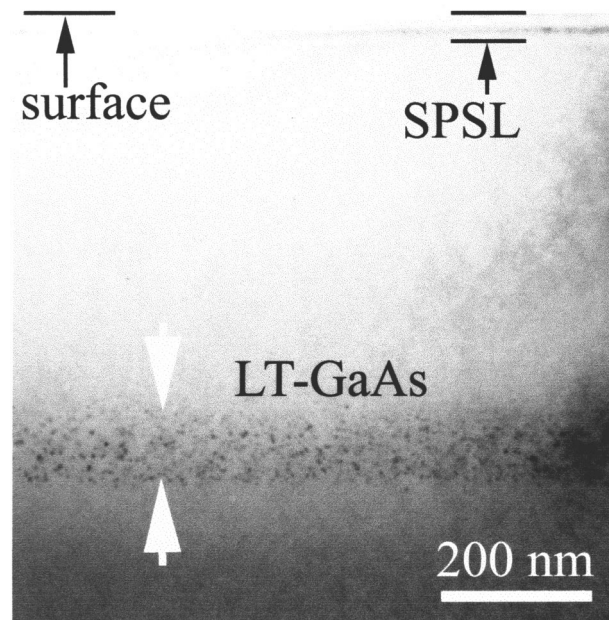


Рис. 1. Светлопольное ПЭМ изображение ($g = 220$) поперечного сечения P -структуры.

p^+ -подложке — сплав AuZn. Контакты формировались при температуре 400°C .

Измерения CV -характеристик проводились на частоте 10 кГц с помощью емкостного моста E7-14 в интервале температур от 77 до 400 К . Амплитуда измерительного сигнала составляла 40 мВ .

Результаты экспериментов и обсуждение

На рис. 1 представлено ПЭМ изображение поперечного сечения P -структуры. Видно, что слой $LT\text{-GaAs}$, содержащий кластеры мышьяка, имеет толщину $d_{LT} \approx 0.1\text{ мкм}$ и заключен между двумя слоями $p\text{-GaAs}$, не содержащими кластеров. Двумерная концентрация As кластеров (N_{CL}) в слое $LT\text{-GaAs}$ составляет около $6 \times 10^{11}\text{ см}^{-2}$ и их средний диаметр (d_{CL}) лежит в диапазоне от 5 до 7 нм . ПЭМ изображения N -структуры приведены в работе [7]. В N -структуре $d_{LT} \approx 0.1\text{ мкм}$, $N_{CL} \approx 4 \times 10^{11}\text{ см}^{-2}$ и $d_{CL} = 6\text{--}8\text{ нм}$. Таким образом, P - и N -структуры были близки друг к другу по геометрическим характеристикам, параметрам систем кластеров, а также по уровню легирования прилегающих к слою $LT\text{-GaAs}$ областей p - и n -типа соответственно. Следует отметить, что в обеих структурах отсутствуют протяженные дефекты решетки.

CV -характеристики P - и N -структур, измеренные на частоте 10 кГц , приведены на рис. 2, *a* и 3, *a* соответственно. Пользуясь приближением обедненного слоя, из CV -характеристик были рассчитаны эффективные профили распределения концентрации свободных носите-

лей ($N_{CV} - W$) (рис. 2, *b* и 3, *b*) [8]:

$$N_{CV}(W) = \frac{C^3}{q\varepsilon\varepsilon_0 \left(\frac{dC}{dV}\right)}, \quad W = A \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{C}, \quad (1)$$

где q — заряд электрона, ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость, ε — диэлектрическая проницаемость полупроводника, W — ширина области пространственного заряда, A — площадь барьера Шоттки.

При увеличении обратного напряжения (V_{rev}) на P -структуре при температуре $T = 77\text{ К}$ наблюдается плавное уменьшение емкости в диапазоне $V_{rev} = 0\text{--}0.2\text{ В}$, за которым следует резкое падение емкости при $V_{rev} \approx 0.3\text{ В}$ (рис. 2, *a*). При дальнейшем увеличении обратного напряжения ($V_{rev} = 0.4\text{--}6\text{ В}$) снова наблюдается плавное уменьшение емкости P -структуры. При $V_{rev} > 6\text{ В}$ емкость P -структуры практически не изменяется. Из расчета эффективного профиля распределения носителей заряда $N_{CV} - W$ в P -структуре видно (рис. 2, *b*), что участки плавного изменения емкости структуры связаны с однородным уровнем легирования $p\text{-GaAs}$ буферов на уровне $(1\text{--}3) \times 10^{16}\text{ см}^{-3}$. Участок резкого падения емкости при $V_{rev} \approx 0.3\text{ В}$ обусловлен наличием широкой области пространственного заряда (ОПЗ) толщиной $\approx 0.7\text{ мкм}$, внутри которой расположен слой $LT\text{-GaAs}$ толщиной 0.1 мкм (рис. 2, *b*). Такое распределение носителей заряда $N_{CV} - W$ по толщине P -структуры, по-видимому, связано с тем, что в слое $LT\text{-GaAs}$, содержащем кластеры As, аккумулируется большой положительный заряд, который индуцирует широкую встроенную ОПЗ. Участок резкого падения емкости P -структуры наблюдается, когда при $V_{rev} \approx 0.3\text{ В}$

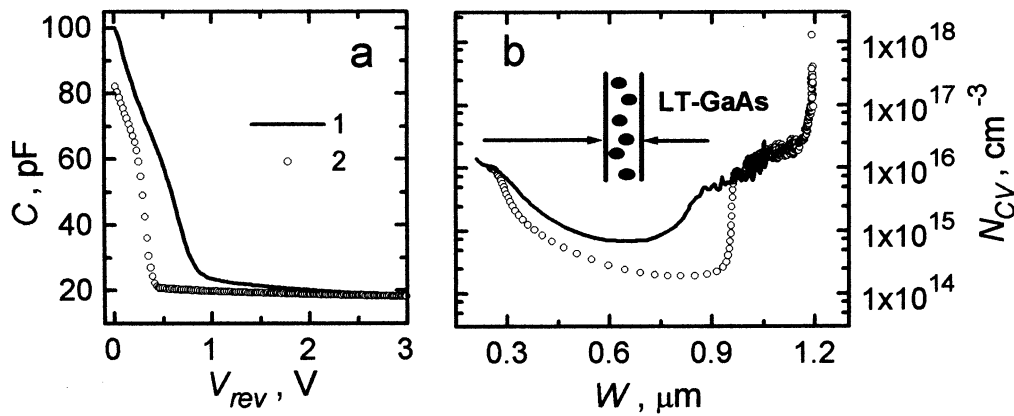


Рис. 2. $C - V$ - (a) и $N_{CV} - W$ - (b) характеристики P -структуры, измеренные на частоте 10 кГц при 290 (1) и 77 К (2). На вставке — положение слоя LT -GaAs.

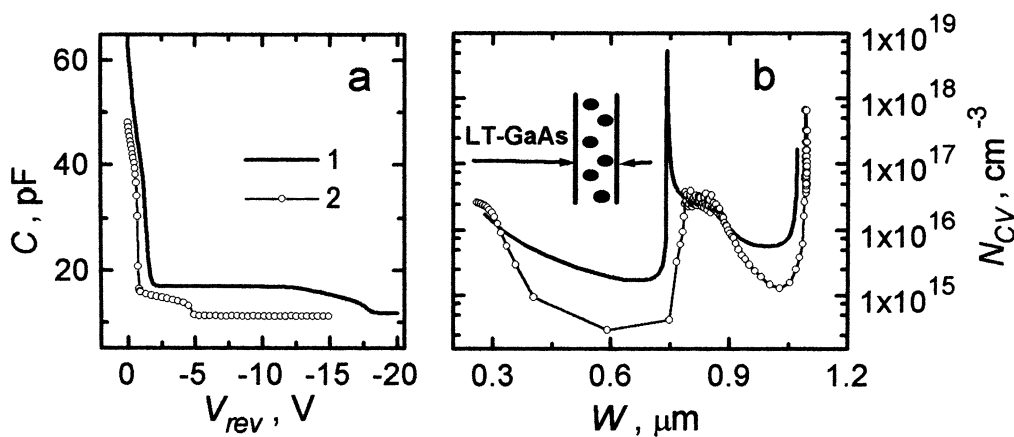


Рис. 3. $C - V$ - (a) и $N_{CV} - W$ - (b) характеристики N -структуры, измеренные на частоте 10 кГц при 290 (1) и 94 К (2). На вставке — положение слоя LT -GaAs.

ОПЗ барьера Шоттки смыкается с ОПЗ, индуцированной вокруг слоя LT -GaAs. При $V_{rev} > 6$ В ОПЗ барьера Шоттки упирается в сильно легированную p^+ -подложку, поэтому емкость P -структуры практически не изменяется, а на $N_{CV} - W$ -характеристике наблюдается рост концентрации при $W = 1.2$ мкм, соответствующей суммарной толщине эпитаксиальных слоев P -структуры (рис. 2, b).

При повышении температуры до 290 К форма CV -характеристики P -структуры практически не изменяется, а вся кривая сдвигается в область более высоких обратных напряжений (рис. 2, a), потому что уменьшается величина встроенного потенциала барьера Шоттки [7]. При этом CV - и $N_{CV} - W$ -характеристики становятся более плавными, так как с ростом температуры увеличивается дебаевская длина экранирования [7], которая определяет разрешение CV -метода. Следует отметить, что концентрация свободных носителей в p -GaAs-буферах структуры, определенная из $N_{CV} - W$ -характеристик (рис. 2, b), практически не зависит от температуры, что указывает

на низкую концентрацию электрически активных дефектов в этих эпитаксиальных слоях.

На CV -характеристике N -структуры при $T = 94$ К наблюдается два участка плавного изменения емкости (при $V_{rev} = 0 - 0.5$ В и $V_{rev} = 1.0 - 4.2$ В) (рис. 3, a), которые связаны с однородным легированием n -GaAs-буферов на уровне $\approx 3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3, b). При величине $V_{rev} > -5$ В емкость N -структуры практически не изменяется, так как край ОПЗ барьера Шоттки достиг сильно легированной n^+ -подложки на глубине 1.1 мкм (рис. 3, b), соответствующей суммарной толщине эпитаксиальных слоев N -структуры. Резкое падение емкости при $V_{rev} \approx 0.7$ В связано с аккумуляцией отрицательного заряда электронов в слое LT -GaAs и наблюдается, когда ОПЗ барьера Шоттки смыкается с ОПЗ, образующимся вокруг слоя LT -GaAs (рис. 3, b). Расчет эффективного профиля распределения свободных носителей $N_{CV} - W$ по формуле (1) показывает, что в N -структуре при 94 К вокруг слоя LT -GaAs толщиной 0.1 мкм образуется область пространственного заряда толщиной 0.45 мкм (рис. 3, b).

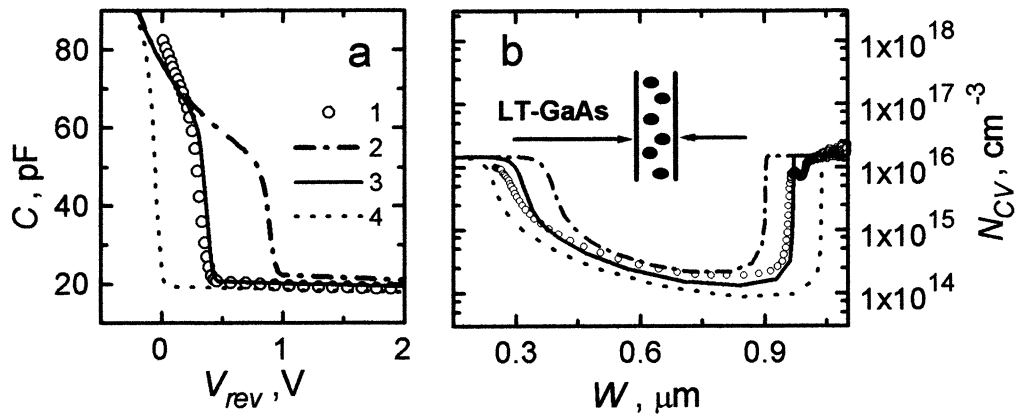


Рис. 4. $C - V$ - (a) и $N_{CV} - W$ - (b) характеристики P -структуры, измеренные на частоте 10 кГц при 77 К (1). Модельные расчеты $C - V$ - и $N_{CV} - W$ -характеристик P -структуры проведены при фиксированном значении плотности заряда, аккумулированного в слое LT -GaAs: $N_Q^{LT} = 6.0 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (2), $N_Q^{LT} = 8.0 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (3) и $N_Q^{LT} = 1.0 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (4). На вставке — положение слоя LT -GaAs.

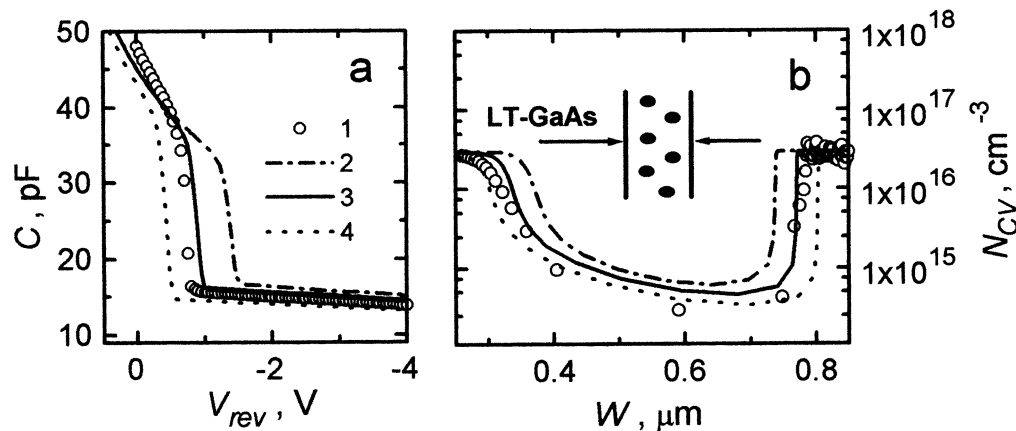


Рис. 5. $C - V$ - (a) и $N_{CV} - W$ - (b) характеристики N -структуры, измеренные на частоте 10 кГц при 94 К (1). Модельные расчеты $C - V$ - и $N_{CV} - W$ -характеристик N -структуры проведены при $T = 94 \text{ К}$ и фиксированном значении плотности заряда, аккумулированного в слое LT -GaAs: $N_Q^{LT} = 0.8 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (2), $N_Q^{LT} = 1.0 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (3) и $N_Q^{LT} = 1.2 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (4). На вставке — положение слоя LT -GaAs.

Второй скачок емкости при $V_{rev} \approx 5 \text{ В}$ обусловлен наличием в N -структурах ОПЗ, геометрически расположенной на границе первого n -GaAs-буфера и n^+ -подложки (рис. 3, b). По нашему мнению, это связано с наличием электрически активных дефектов на металлургической границе n^+ -подложки и первого эпитаксиального слоя. В случае P -структуры перед выращиванием первого p -GaAs-буфера на p^+ -подложку был предварительно нанесен слой GaAs, сильно легированный Ве. Как видно из эффективного профиля распределения $N_{CV} - W$ (рис. 2, b), ОПЗ на границе первого буфера и p^+ -подложки отсутствует, так как электрически активные дефекты на поверхности p^+ -подложки нейтрализованы.

Итак, при низкой температуре CV -характеристики P - и N -структур качественно подобны. Однако при $T = 290 \text{ К}$ на CV -характеристике N -структуры появляется широкое

плато квазипостоянной емкости в диапазоне V_{rev} от -1.8 до -11.5 В (рис. 3, a). Ранее было показано, что это плато связано с эмиссией электронов, аккумулированных в слое LT -GaAs [6,7]. Темп эмиссии уменьшается при понижении температуры. Как можно видеть из рис. 3, a, эмиссия электронов из слоя LT -GaAs в N -структуре полностью подавлена при 94 К, так что плато на CV -характеристике не наблюдается. Отсутствие участка квазипостоянной емкости на CV -характеристике P -структуры не только при низкой, но и при комнатной температуре (рис. 2, a) означает, что темп эмиссии дырок из слоя LT -GaAs в P -структуре значительно ниже темпа эмиссии электронов из слоя LT -GaAs в N -структуре.

Для оценки заряда, аккумулированного в слое LT -GaAs, было проведено моделирование CV - и $N_{CV} - W$ -характеристик P - и N -структур при низких температурах. Модельные расчеты основаны на числен-

ном решении одномерного уравнения Пуассона методом конечных разностей [9,10]. При этом предполагалось, что темп эмиссии аккумулярованных носителей мал, так что концентрация электронов или дырок (N_Q^{LT}), локализованных в слое *LT*-GaAs, не зависит от обратного напряжения V_{rev} на структуре.

Из количественного анализа *CV*- и $N_{CV} - W$ -характеристик *P*-структуры при $T = 77$ К (рис. 4, *a* и *b*) было установлено, что в слое *LT*-GaAs аккумуляруется заряд, соответствующий слоевой концентрации дырок $N_Q^{LT} = 0.8 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Сравнение расчетов с экспериментальными результатами для *N*-структуры показало (рис. 5, *a* и *b*), что наилучшее совпадение наблюдается при $N_Q^{LT} = 1.0 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Таким образом, проведенные исследования показали, что слой *LT*-GaAs, содержащий кластеры мышьяка, аккумулярует электроны, если он помещен между слоями *n*-GaAs, и аккумулярует дырки, если он помещен между слоями *p*-GaAs. При этом вокруг слоя *LT*-GaAs происходит образование широкой области пространственного заряда. Численный анализ *CV*- и $N_{CV} - W$ -характеристик на основе одномерного решения уравнения Пуассона показал, что и электроны, и дырки аккумуляруются на локальных уровнях, расположенных несколько выше середины запрещенной зоны GaAs. Такие уровни могут быть обусловлены как точечными дефектами, так и наноразмерными кластерами. Концентрации последних ($N_{CL} \approx 4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ для *N*-структуры и $N_{CL} \approx 6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ для *P*-структуры), определенные методом ПЭМ, оказались близкими к концентрации аккумулярованных в *LT*-GaAs носителей заряда ($N_Q^{LT} = 1.0 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ для *N*-структуры и $N_Q^{LT} = 8 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ для *P*-структуры).

Заключение

Проведенные исследования *CV*-характеристик *n-LT-n* и *p-LT-p*-структур с барьером Шоттки позволяют заключить, что слои *LT*-GaAs, содержащие наноразмерные кластеры мышьяка, аккумуляруют соответственно электроны или дырки и индуцируют обширные области обеднения в прилегающих слоях *n*- или *p*-типа. Концентрация аккумулярованных основных носителей ($8 \div 10$) $\times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ оказалась близкой к концентрации кластеров As в слое *LT*-GaAs. Уровни, на которых аккумуляруются электроны и дырки, расположены несколько выше середины запрещенной зоны GaAs. Установлено, что при приложении обратного напряжения темп эмиссии дырок из слоя *LT*-GaAs в *P*-структуре значительно ниже темпа эмиссии электронов из слоя *LT*-GaAs в *N*-структуре.

Работа была выполнена при поддержке Министерства науки России по программам "Фуллерены и атомные кластеры" и "Физика твердотельных наноструктур" (97-1035), а также Российского фонда фундаментальных исследований (98-02-17617) и INTAS (97-30930).

Список литературы

- [1] F.W. Smith, A.R. Calawa, C.L. Chen, M.J. Mantra, L.J. Mahoney. IEEE Electron. Dev. Lett., **9**, 77 (1988).
- [2] M. Kaminska, Z. Liliental-Weber, E.R. Weber, T. George, J.B. Kortright, F.W. Smith, B.Y. Tsaur, A.R. Calawa. Appl. Phys. Lett., **54**, 1831 (1989).
- [3] M.R. Melloch, K. Mahalingam, N. Otsuka, J.M. Woodall, A.C. Warren. J. Cryst. Growth, **111**, 39 (1991).
- [4] Н.А. Берт, А.И. Вейнгер, М.Д. Вилисова, С.И. Голощапов, И.В. Ивонин, С.В. Козырев, А.Е. Куницын, Л.Г. Лаврентьева, Д.И. Лубышев, В.В. Преображенский, Б.Р. Семягин, В.В. Третьяков, В.В. Чалдышев, М.П. Якубеня. ФТТ, **35**, 2609 (1993).
- [5] В.В. Чалдышев, М.А. Путьято, Б.Р. Семягин, В.В. Преображенский, О.П. Пчеляков, А.В. Хан, В.Г. Канаев, Л.С. Широкова, А.В. Голиков, В.А. Кагадей, Ю.В. Лиленко, Н.В. Карпович. Электронная промышленность. № 1-2, 154 (1998).
- [6] P.N. Brunkov, V.V. Chaldyshev, A.A. Suvorova, N.A. Bert, S.G. Konnikov, A.V. Chernigovskii, V.V. Preobrazhenskii, M.A. Putyato, B.R. Semyagin. Appl. Phys. Lett., **73**, 2796 (1998).
- [7] П.Н. Брунков, В.В. Чалдышев, Н.А. Берт, А.А. Суворова, С.Г. Конников, А.В. Черниговский, В.В. Преображенский, М.А. Путьято, Б.Р. Семягин. ФТП, **32**, 1170 (1998).
- [8] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов (М., Мир, 1984).
- [9] П.Н. Брунков, С.Г. Конников, В.М. Устинов, А.Е. Жуков, А.Ю. Егоров, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, П.С. Копьев. ФТП, **30**, 924 (1996).
- [10] П.Н. Брунков, А.А. Суворова, Н.А. Берт, А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, А.Ю. Егоров, В.М. Устинов, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, П.С. Копьев, С.Г. Конников, Л. Ивс, П.С. Майн. ФТП, **32**, 1229 (1998).

Редактор В.В. Чалдышев

Majority charge carrier accumulation in GaAs layers containing nanoscale arsenic clusters

P.N. Brunkov, V.V. Chaldyshev, A.V. Chernigovskii, A.A. Suvorova, N.A. Bert, S.G. Konnikov, V.V. Preobrazhenskii*, M.A. Putyato*, B.R. Semyagin*

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract Accumulation of electrons and holes has been revealed by a capacitance-voltage technique in As-cluster-containing GaAs layers sandwiched between *n*-type or *p*-type GaAs buffers. As a result of the majority carrier accumulation, large depletion regions form in adjacent buffers. Simulation of the capacitance-voltage characteristics based on numerical solution of the Poisson equation shows the coconcentration of accumulated charge to be as high as $\sim 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ which is comparable with the concentration of nanoscale As clusters determined from transmission electron microscopy study.