

Аккумуляция электронов в слоях GaAs, выращенных при низкой температуре и содержащих кластеры мышьяка

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

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

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

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

(Получена 10 февраля 1998 г. Принята к печати 11 февраля 1998 г.)

Методом емкостной спектроскопии исследованы свойства барьеров Шоттки Au/GaAs на структурах, в которых тонкий слой арсенида галлия, выращенный при низкой температуре (*LT*-GaAs) и содержащий кластеры As, был вставлен между двумя однородно легированными слоями *n*-GaAs, выращенными при стандартных температурах. Обнаружена аккумуляция электронов в слое *LT*-GaAs, которая сопровождается образованием областей обеднения в прилегающих слоях *n*-GaAs. Эмиссия электронов из *LT*-GaAs при 300 К приводит к появлению протянутого плато на зависимости емкости от напряжения. Установлено, что наличие слоя *LT*-GaAs толщиной 0.1 мкм, вставленного между гораздо более толстыми слоями *n*-GaAs, приводит к увеличению напряжения электрического пробоя до 230 кВ/см, что значительно превышает величины, характерные для стандартных структур Au/*n*-GaAs.

Введение

Арсенид галлия, выращенный методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низких температурах $T < 300^\circ\text{C}$ (*LT*-GaAs), привлекает большое внимание благодаря большому электрическому сопротивлению, высокому напряжению пробоя и рекордно малому времени жизни неравновесных носителей заряда [1–5]. Главной особенностью *LT*-GaAs является избыток мышьяка (до 1.5 ат%), захватываемый в растущий слой при низкотемпературной эпитаксии. При этом создается высокая концентрация точечных дефектов, типа антиструктурного дефекта As_{Ga} межзельного мышьяка As_i , вакансии галлия V_{Ga} и их комплексов. В процессе отжига *LT*-GaAs при высокой температуре ($T > 500^\circ\text{C}$) происходит формирование наноразмерных кластеров As, встроенных в матрицу GaAs. Такие кластеры, как и точечные дефекты, должны быть электрически активными и могут влиять на электронные свойства материала.

В данной работе методом емкостной спектроскопии исследованы структуры с барьером Шоттки Au/GaAs, в которых тонкий слой *LT*-GaAs, содержащий кластеры As, был вставлен между двумя однородно легированными слоями *n*-GaAs, выращенными при стандартных температурах. Цель работы состоит в исследовании влияния тонкого слоя *LT*-GaAs на электрические свойства структуры.

Образцы и методика эксперимента

Исследованные образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии в двухкамерной установке "Катунь" на подложках n^+ -GaAs с ориентацией

(100). Образцы состояли из слоя *n*-GaAs(Si) (толщина ~ 0.5 мкм, температура роста 580°C , концентрация электронов $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$), слоя *LT*-GaAs (толщина ~ 0.1 мкм, температура роста 200°C) и слоя *n*-GaAs(Si) (толщина ~ 0.5 мкм, температура роста 580°C , концентрация электронов $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$). Выращивание верхнего *n*-GaAs слоя структуры в течение 0.5 ч приводило к отжигу слоя *LT*-GaAs и формированию в нем кластеров мышьяка.

Исследования кристаллической структуры образцов проводились методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в поперечном сечении и в плоскости роста. Использовался электронный микроскоп Philips EM 420 с ускоряющим напряжением 100 кВ.

Барьеры Шоттки формировались путем напыления Au на поверхность образцов. Диаметр контактов Шоттки составлял 0.35 мм. Исследования вольт-фарадных ($C-V$) характеристик проводились на частотах 100 Гц–1 МГц в диапазоне температур 77–300 К. Амплитуда измеряемого сигнала была 25 мВ. Кроме того, исследовались зависимости проводимости (G) структуры от величины обратного смещения.

Электрохимическое $C-V$ -профилирование было проведено по стандартной методике на частоте 3 кГц [6].

Результаты эксперимента

На рис. 1, *a, b* представлены электронно-микроскопические изображения поперечного сечения одной из исследованных структур. Видно, что слой *LT*-GaAs, содержащий кластеры мышьяка, имеет толщину ~ 0.1 мкм и заключен между слоями *n*-GaAs, не содержащими кластеров. Плотность кластеров в слое составляет $\sim 4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, а их средний размер ~ 10 нм.

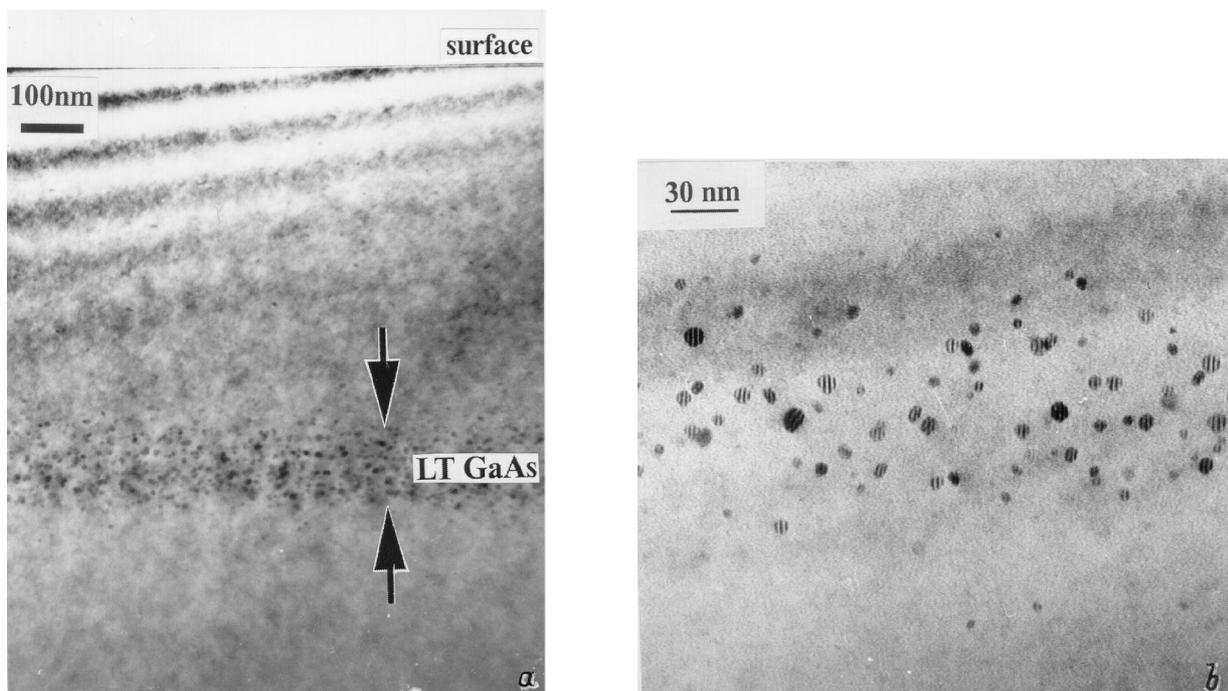


Рис. 1. *a* — светлопольное ПЭМ изображение ($g = 220$) поперечного сечения структуры $n\text{-GaAs/LT-GaAs/n-GaAs}$. *b* — увеличенное ПЭМ изображение тонкого слоя $LT\text{-GaAs}$, содержащего кластеры мышьяка.

Вольт-фарадные характеристики структуры $\text{Au/n-GaAs/LT-GaAs/n-GaAs/n}^+\text{-GaAs}$, измеренные на частоте 10 кГц при 94 и 300 К, представлены на рис. 2, *a*.

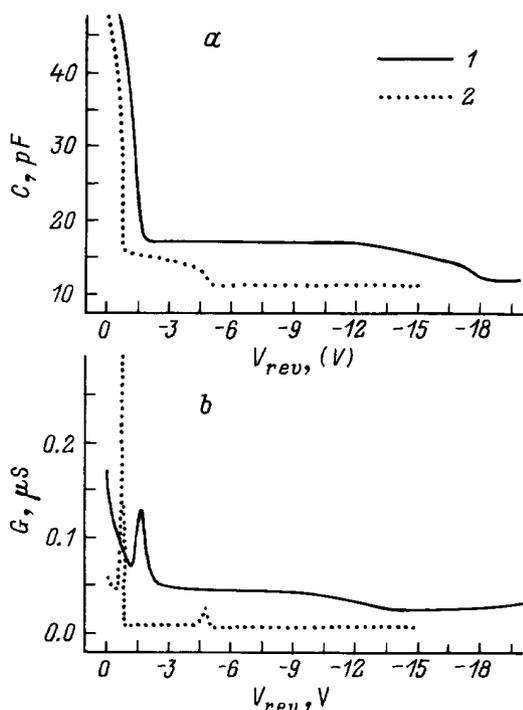


Рис. 2. $C\text{-}V$ - (*a*) и $G\text{-}V$ - (*b*) характеристики структуры $\text{Au/n-GaAs/LT-GaAs/n-GaAs/n}^+\text{-GaAs}$, измеренные на частоте 10 кГц при 300 К (1) и 94 К (2).

При 300 К с увеличением обратного смещения емкость сначала быстро уменьшается, затем (при -2 В) резко падает и далее остается почти постоянной в широком интервале напряжений. Область квазипостоянной емкости простирается от 2 до -12 В . При дальнейшем увеличении обратного напряжения емкость постепенно уменьшается. При напряжениях около -25 В наблюдается электрический пробой.

При уменьшении температуры широкое плато на $C\text{-}V$ -характеристиках постепенно сужается. При 95 К плато не наблюдается, и за скачком емкости при -2 В сразу происходит ее постепенное уменьшение (рис. 2, *a*). Следует отметить, что наблюдаемые особенности $C\text{-}V$ -характеристик при 300 и 94 К не связаны с токами утечки. Как видно из рис. 2, *b*, проводимость структуры при обратных смещениях мала. Пики проводимости связаны с резкими изменениями емкости при увеличении обратного напряжения.

Пользуясь приближением обедненного слоя, из $C\text{-}V$ -характеристики были рассчитаны профили распределения концентрации свободных носителей ($N_{CV}\text{-}W$):

$$N_{CV}(W) = \frac{C^3}{q\epsilon\epsilon_0 \left(\frac{dC}{dV}\right)}, \quad W = A \frac{\epsilon\epsilon_0}{C}, \quad (1)$$

где q — заряд электрона, ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость, ϵ — диэлектрическая проницаемость полупроводника, W — ширина области пространственного заряда, A — площадь барьера Шоттки. Рассчитанные профили для 300 и 94 К представлены на рис. 3, *a*.

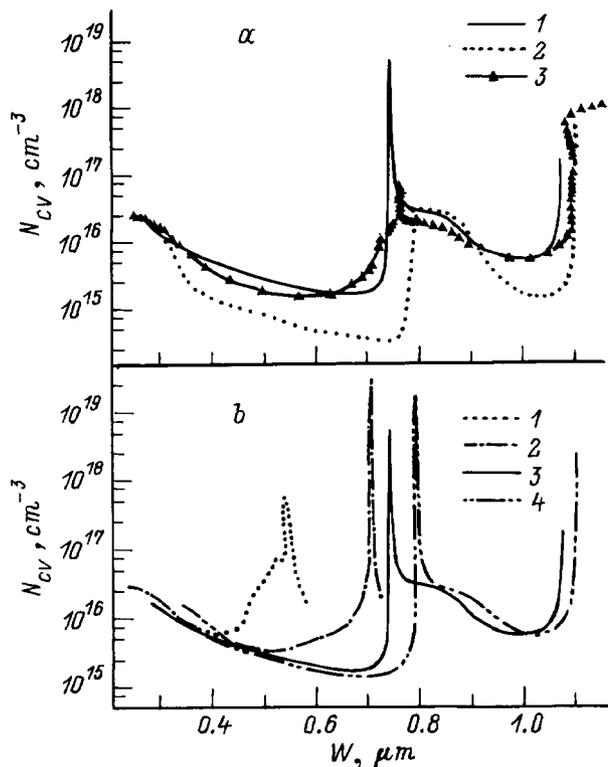


Рис. 3. *a* — сравнение N_{CV} – W -характеристик, рассчитанных из C – V -измерений на частоте 10 кГц при 300 К (1) и 94 (2) с электрохимическим профилем (3). *b* — N_{CV} – W -характеристики, рассчитанные из C – V -измерений при 300 К на разных частотах: 100 Гц (1), 1 кГц (2), 10 кГц (3), 1 МГц (4).

Как видно из рис. 3, *a*, концентрация электронов вблизи поверхности ($W < 0.35$ мкм) составляет $\sim 2.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что согласуется с ожиданием из технологии уровнем легирования верхнего слоя n -GaAs. В диапазоне $0.35 < W < 0.75$ мкм наблюдается область обеднения, охватывающая слой LT -GaAs и прилегающие слои n -GaAs. За пределами области обеднения концентрация электронов вновь достигает значения, близкого к $2.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что соответствует уровню легирования нижнего слоя n -GaAs. При дальнейшем увеличении W наблюдается еще одна область обеднения, по-видимому, обусловлена дефектами на металлургической границе подложка — эпитаксиальная пленка. Непосредственно за этой областью обеднения концентрация носителей резко возрастает до $\sim 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что соответствует уровню легирования подложки n^+ -GaAs. Полученное из C – V -измерений распределение концентрации носителей по глубине хорошо согласуется с профилем концентрации носителей заряда, полученным независимо методом электрохимического профилирования (см. рис. 3, *a*).

Особенностью профиля $N_{CV} - W$, рассчитанного для 300 К, является наличие узкого пика, обусловленного эмиссией электронов и соответствующего плато на C – V -характеристиках (рис. 3, *a*). В диапазоне частот измерений от 1 МГц до 10 кГц этот пик располагает-

ся на краю области обеднения, индуцированной слоем LT -GaAs. Однако при меньших частотах измерений пик смещается в середине области обеднения, и при предельно низких частотах (~ 100 Гц) его положение соответствует геометрическому положению слоя LT -GaAs в структуре (рис. 3, *b*). Следует отметить, что при 94 К плато на C – V -характеристиках не наблюдается и пик эмиссии в профилях $N_{CV} - W$ отсутствует при любых использованных частотах измерений.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что присутствие тонкого слоя LT -GaAs приводит к значительному увеличению напряжения электрического пробоя диода Шоттки. Средняя по структуре напряженность электрического поля пробоя составляет ~ 230 В/см, что соответствует значениям, характерным для толстых слоев LT -GaAs [7], и существенно превышает величины, характерные для обычного n -GaAs и стехиометрического полупроводящего GaAs.

Наблюдаемое поведение C – V - и N_{CV} – W -характеристик указывает на аккумуляцию электронов внутри и истощения вокруг слоя LT -GaAs [8–10]. Наличие встроенных областей обеднения приводит к появлению скачка на C – V -характеристиках при -2 В, когда эти области начинают перекрываться с областью объемного заряда барьера Шоттки, увеличивающейся с повышением обратного смещения.

Аккумуляция электронов с слое LT -GaAs может происходить как на дефектах с глубокими уровнями, так и на кластерах мышьяка. Параметры глубоких уровней, характерных для LT -GaAs, были исследованы ранее методами нестационарной емкости и температурно-зависимой проводимости [11–15]. Такими уровнями являются $EL2$ (0.73 эВ), $EB4$ (0.65 эВ) и $EL3$ (0.57 эВ). Исследования с использованием сканирующей туннельной микроскопии показали [16], что кластеры мышьяка также создают уровни в глубине запрещенной зоны GaAs. Указанные электронные уровни частично скомпенсированы акцепторами, в качестве которых могут выступать, например, вакансии галлия [17]. Концентрация компенсирующих акцепторов в LT -GaAs весьма велика и в неотожженном материале достигает 10^{18} см^{-3} , что значительно превышает концентрацию легирующих мелких доноров Si ($2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$). Можно ожидать, что концентрация компенсирующих акцепторов остается высокой и после отжига слоев LT -GaAs, несмотря на преобразование основной части точечных дефектов, обусловленных избытком мышьяка, в наноразмерные кластеры. В таком случае аккумуляция заряда в слое LT -GaAs будет происходить за счет перехода электронов на глубокие электронные уровни (обусловленные точечными дефектами или кластерами) с мелких донорных уровней из прилегающих слоев n -GaAs. В результате слой LT -GaAs окажется окруженным областями объемного

заряда. Полагая, что концентрация скомпенсированных глубоких уровней в LT -GaAs много больше концентрации n мелких доноров в n -GaAs, ширина области обеднения составляет

$$\Delta W = 2\sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\Delta V}{qn}} + d_{LT}, \quad (2)$$

где ΔV — контактная разность потенциалов, $d_{LT} = 0.1$ мкм — толщина слоя LT -GaAs. Полагая $\Delta V \approx 0.5$ В, получим $\Delta W \approx 0.4$ мкм, что соответствует экспериментально определенной ширине области обеднения (рис. 3, а).

Таким образом, исследования C – V -характеристик показали, что слой LT -GaAs аккумулирует электроны и индуцирует области объемного заряда в прилегающих слоях n -GaAs. Внешнее смещение должно, вообще говоря, приводить к эмиссии аккумулированного заряда. Однако, поскольку уровни, на которые захвачены электроны, расположены в глубине запрещенной зоны GaAs, темп эмиссии должен сильно зависеть от температуры. При низкой температуре темп эмиссии чрезвычайно мал и при 94 К мы не наблюдали характерного плато на C – V -характеристиках даже при понижении частоты до 100 Гц. При комнатной температуре темп эмиссии достаточно велик, однако даже в этом случае на высокой частоте не удается устанавливать квазиравновесие. В результате обусловленный эмиссией электронов пик на N_{CV} – W -характеристике оказывается сдвинут относительно геометрического положения слоя LT -GaAs к краю области обеднения (рис. 3, а) [18]. Ситуацию, близкую к квазиравновесной, удается реализовать при понижении частоты измерения с 1 МГц до 100 Гц. При этом происходит увеличение значения емкости в области плато с 17 пФ до 26 пФ, пик на N_{CV} – W -характеристике сдвигается к геометрическому положению слоя LT -GaAs (рис. 3, б).

Концентрацию эмитированных электронов n_e можно оценить по ширине плато квазипостоянной емкости на C – V -характеристиках по соотношению [10]:

$$n_e = C^* \Delta U / Aq, \quad (3)$$

где C^* — величина квазипостоянной емкости на плато, ΔU — ширина плато. Подставляя экспериментальные данные рис. 2, а и учитывая, что площадь барьера $A = 1.1 \times 10^{-3}$ см², получаем $n_e \approx 1 \times 10^{12}$ см⁻².

Концентрацию электронов n_a , аккумулированных в слое LT -GaAs, можно оценить по ширине области обеднения и известному уровню легирования мелкими донорами:

$$n_a = n\Delta W = 0.8 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}. \quad (4)$$

Оценки, сделанные по формулам (3) и (4), показывают, что $n_e \approx n_a$, т.е. при комнатной температуре с помощью внешнего смещения удается осуществить эмиссию электронов, аккумулированных в слое LT -GaAs в исходном состоянии.

Заключение

Проведенные исследования структур с барьерами Шоттки Au/ n -GaAs/ LT -GaAs/ n -GaAs показали, что наличие тонкого слоя LT -GaAs, вставленного между гораздо более толстыми слоями n -GaAs, приводит к значительному увеличению напряжения электрического пробоя по сравнению с наблюдаемым в стандартных структурах Au/ n -GaAs.

В результате исследования вольт-фарадных характеристик барьеров Шоттки установлено, что наличие тонкого слоя LT -GaAs, содержащего систему глубоких уровней точечных дефектов и наноразмерных кластеров мышьяка, приводит к аккумуляции в нем носителей заряда и формированию областей обеднения в прилегающих слоях n -GaAs. На C – V -характеристиках при 300 К обнаружено широкое плато квазипостоянной емкости. Это плато скорее всего обусловлено эмиссией электронов с глубоких уровней и их кластеров мышьяка в LT -GaAs. Концентрации аккумулированных и эмиттированных электронов оказались близкими и составляют $\sim 1 \times 10^{12}$ см⁻². При низкой температуре (94 К) эмиссия электронов экспериментально не наблюдается.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований и министерством науки России (программы: "Фуллерены и атомные кластеры" и "Физика твердотельных наноструктур").

Список литературы

- [1] F.W. Smith, A.R. Calawa, C.L. Chen, M.J. Mantra, L.J. Mahoney. Electron. Dev. Lett., **9**, 77 (1988).
- [2] M. Kaminska, Z. Liliental-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. Берг, А.И. Вейнгер, М.Д. Вилисова, С.И. Голощанов, 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. Якубена. ФТТ, **35**, 2609 (1993).
- [5] J.K. Luo, H. Thomas, D.V. Morgan, D. Westwood, R.H. Williams. Semicond. Sci. Technol., **9**, 2199 (1994).
- [6] P. Blood. Semicond. Sci. Technol., **1**, 7 (1986).
- [7] E.R. Brown, K.A. McIntosh, K.B. Nichols, C.L. Dennis. Appl. Phys. Lett., **66**, 285 (1995).
- [8] П.Н. Брунков, С.Г. Конников, В.М. Устинов, А.Е. Жуков, А.Ю. Егоров, В.М. Максимов, Н.Н. Леденцов, П.С. Копьев. ФТП, **30**, 924 (1996).
- [9] P.N. Brounkov, T. Benyattou, G. Guillot. J. Appl. Phys., **80**, 864 (1996).
- [10] K. Kreher. Phys. St. Sol. A, **135**, 597 (1993).
- [11] D.C. Look, D.C. Walters, M.O. Manasreh, J.R. Sizelove, C.E. Stutz, K.R. Evans. Phys. Rev., B, **42**, 3578. (1990).
- [12] H. Fujioka, E.R. Weber, A.K. Verma. Appl. Phys. Lett., **66**, 2834 (1995).

- [13] D.C. Look, Z.Q. Fang, H. Yamamoto, J.R. Sizelove, M.G. Mier, E. Stutz. *J. Appl. Phys.*, **76**, 1029 (1994).
- [14] C.H. Goo, W.S. Lau, T.C. Chong, L.S. Tan. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 2543 (1996).
- [15] T.C. Lin, T. Okumura. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **1630** (1996).
- [16] S. Hong, R. Reifenberger, D.B. Janes, D. McInturff, J.M. Woodal. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2258 (1996).
- [17] J. Gebauer, R. Krause-Rehberg, S. Eichler, M. Luysberg, H. Sohn, E.R. Weber. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 638 (1997).
- [18] P.N. Brounkov, N.N. Faleev, Yu.G. Musikhin, A.A. Suvorova, A.F. Tsatsul'nikov, V.M. Maximov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, S.G. Konnikov. *Inst. Phys. Conf. Ser.* **155** (IOP, Bristol, 1997) p. 841.

Редактор В.В. Чалдышев

Electron accumulation in GaAs layers grown at low temperatures and containing arsenic clusters

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

A.F. Ioffe Physico-technical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* St. Petersburg State Technical University,
195251 St. Petersburg, Russia

† Institute of Semiconductor Physics,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract Capacitance spectroscopy was used to investigate properties of Au/GaAs Schottky barrier structures, where a thin GaAs layer grown at low temperature (*LT*-GaAs) was sandwiched between two uniformly doped *n*-GaAs layers grown at standard temperatures. We found electron accumulation in *LT*-GaAs surrounded by two depletion regions in adjacent *n*-GaAs layers. Emission of electrons from *LT*-GaAs at 300 K resulted in a long plateau in capacitance-voltage characteristic. It has been shown that presence of the 0.1 μm thick layer of *LT*-GaAs gives rise to an increase in the breakdown electric field up to 230 kV/cm that is much higher than typical values for standard Au/*n*-GaAs structures.

Fax: (812) 2471017 (Brounkov)

E-mail: pnbru@charm.ioffe.rssi.ru