

УДК 537.311.322

ВЛИЯНИЕ ВСТАВОК АРСЕНИДА ИНДИЯ НА ПОДВИЖНОСТИ ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ ИНДИЙ-ГАЛЛИЙ-МЫШЬЯК, ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ ФОСФИДА ИНДИЯ

Кульбачинский В.А., Юзеева Н.А., Лунин Р.А., Овешников Л.Н.

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, e-mail: kulb@mig.phys.msu.ru

Исследованы температурные зависимости сопротивления в интервале температур $4,2 < T < 300$ К, эффект Холла и эффект Шубникова-де Гааза в структурах $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{InP}$ с изоморфной к подложке квантовой ямой $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ с нановставками InAs в центр квантовой ямы. Структуры были двухсторонне дельта легированы кремнием. С помощью эффекта Шубникова-де Гааза измерены концентрации электронов в подзонах размерного квантования. Путем самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона рассчитаны зонные диаграммы структур. Проведено сравнение подвижностей электронов в изоморфных квантовых ямах с напряженной квантовой ямой InAs и показано, что максимальная подвижность электронов наблюдается в квантовой яме со вставкой InAs шириной $d = 3.14$ нм. Проведены расчеты транспортной и квантовой подвижностей электронов при рассеянии на ионизированной примеси при учете межподзонных переходов. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом.

Ключевые слова: изоморфная квантовая яма, подвижности электронов, эффект Шубникова-де Гааза, GaAs, InP

INFLUENCE OF INAS INSERTS ON THE MOBILITY OF TWO-DIMENSIONAL ELECTRONS IN THE QUANTUM WELL INDIUM-GALLIUM ARSENICUM GROWN ON INDIUM-PHOSPHITE SUBSTRATE

Kulbachinskii V.A., Yuzeeva N.A., Lunin R.A., Oveshnikov L.N.

M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, e-mail: kulb@mig.phys.msu.ru

The temperature dependence of resistivity in the temperature interval $4,2 < T < 300$ K, Hall effect and Shubnikov-de Haas effect have been investigated in $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{InP}$ structures with isomorphic $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ quantum well and InAs inserts to the center of the quantum well. The structures are doped by silicon from the both sides of the quantum well. Shubnikov-de Haas effect was used to measure the electron concentrations in dimensionally quantized subbands. The calculation of the band structure was done by self-consistent solution of Schroedinger and Poisson equations in the effective mass approximation. We compared the electron mobility in the isomorphic quantum well with the mobility in the strained InAs quantum well and found the maximal mobility in the quantum well with InAs insert with the width $d = 3.14$ nm. We calculated the transport and quantum electron mobilities taking into the account the ionized impurity scattering with inter subband transitions. The results of calculations are in a good agreement with the experimental data.

Keywords: isomorphic quantum well, electron mobility, Shubnikov-de Haas effect, GaAs, InP

В наногетероструктурах $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$, выращенных на подложках фосфида индия, можно создать двумерные электроны с высокой концентрацией более 10^{12} см^{-2} , высокой подвижностью, высокой дрейфовой скоростью насыщения при комнатной температуре [1–3]. Данные структуры широко применяются для создания СВЧ устройств [4, 5]. Частота работы такого прибора $f = V_{\text{д.н.}}/L_g$ определяется дрейфовой скоростью насыщения $V_{\text{д.н.}}$ и длиной затвора L_g . При этом сейчас возможно создать транзисторы с длиной затвора $L_g \sim 25$ нм, что близко к предельно возможной. Поэтому для увеличения рабочей частоты необходимо увеличение дрейфовой скорости электронов. Это возможно либо выбором полупроводников для создания гетероструктур, либо определенной конструкцией квантовой ямы.

Решеточно-согласованные (изоморфные) с подложкой InP квантовые ямы $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ обладают высоким

содержанием индия $x = 0,53$. В квантовых ямах $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложках GaAs содержание индия ограничено величиной $x = 0,2$ [6]. Увеличение содержания индия необходимо для уменьшения эффективной массы электронов, так как в InAs эффективная масса электронов меньше, чем в GaAs. Однако существуют причины, препятствующие уменьшению эффективной массы двумерных электронов в квантовой яме и увеличению электронной подвижности за счет увеличения содержания индия. Это различные механизмы рассеяния в сложных многослойных гетеросистемах [7]. Поэтому разработка конструкции квантовой ямы, например, содержания индия в квантовой яме, наличие вставок различного состава в яму и исследование их влияния на подвижность электронов в квантовой яме является актуальной задачей.

Можно изменять профиль дна зоны проводимости, то есть делать различные вставки в основную квантовую яму, напри-

мер, узкие, туннельно-прозрачные барьеры [8, 9], что изменяет фоннный спектр и электронную подвижность. А можно вставлять в основную квантовую яму узкие более глубокие квантовые ямы [10]. Введение InAs в квантовую яму, с одной стороны, увеличивает электронную подвижность μ за счет ослабления межподзонного рассеяния электронов и уменьшения эффективной массы электронов m^* в квантовой яме. С другой стороны, увеличение толщины вставленного слоя InAs ограничено критическим значением, превышение которого приводит к ухудшению качества вставки и всей активной области из-за образования дислокаций несоответствия.

В настоящей работе изучалось влияние вставок InAs различной толщины на подвижности электронов в согласованных по пара-

метру решеток квантовых ямах $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ на подложках InP. Использовался эффект Шубникова–де Гааза квантовых осцилляций магнетосопротивления. Проводились расчеты зонных диаграмм структур, квантовых и транспортных подвижностей в подзонах размерного квантования.

Материалы и методы исследований

Для изучения влияния вставок в канал на подвижности носителей заряда в настоящей работе была использована серия из 4-х образцов с изоморфной к подложке InP квантовой ямой $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ со вставками InAs различной толщины в центр ямы. Структура слоев образцов схематически изображена на рис. 1. Образцы 2 и 3, в отличие от образца 1, содержат вставку InAs в квантовой яме, квантовая яма образца 4 состоит только из InAs. Образцы 1–3 дельта-легированы кремнием с двух сторон, образец 4 – с одной стороны.

$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ 54 Å
$\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ 173 Å
$\delta\text{-Si}$ $2,9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
$\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ 47 Å
$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ $(147 \text{ Å} - d)/2$
InAs d
$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ $(147 \text{ Å} - d)/2$
$\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ 47 Å
$\Delta\text{-Si}$ $0,88 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
$\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ 2440 Å
InP (100)

Рис. 1. Структура слоев образцов (серым выделена квантовая яма)

В табл. 1 приведены некоторые параметры образцов, а именно толщина слоя InAs d , концентрация N_{Hall} и подвижность μ_{Hall} , полученные из эффек-

та Холла при 4,2 К и концентрации электронов N_{sdH} в двух подзонах размерного квантования, полученные из эффекта Шубникова–де Гааза.

Таблица 1

Толщина слоя InAs d в центре квантовой ямы шириной L , концентрация N_{Hall} и подвижность μ_{Hall} , полученные из эффекта Холла при 4,2 К и из эффекта Шубникова – де Гааза N_{sdH} в двух подзонах

№ п/п	L , Å	d , Å	N_{Hall} , 10^{12} см^{-2}	μ_{Hall} , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	N_{sdH} , 10^{12} см^{-2}
1	147	0	4,03	27600	2,76; 1,29
2	147	18	2,99	21600	2,3; 0,75
3	147	31,4	3,03	29500	2,44; 0,6
4	97	97	1,30	28400	1,29

У всех образцов были исследованы температурные зависимости сопротивления в интервале температур 4,2–300 К, эффект Холла и эффект Шубникова–де Гааза при температуре 4,2 К в магнитных полях до 6 Тл, создаваемых сверхпроводящим соленоидом.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 представлены зависимости сопротивления на квадрат от температуры

$\rho_{xx}(T)$ для исследованных образцов. При понижении температуры сопротивление уменьшается и показывает преимущественное рассеяние электронов на акустических фоновых в этой области температур. При низких температурах рассеяние на фоновых сменяется рассеянием на ионизированных примесях.

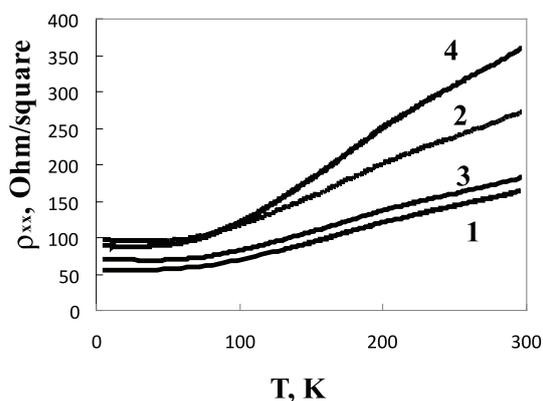


Рис. 2. Зависимости сопротивления на квадрат $\rho_{xx}(T)$ от температуры для исследованных образцов. Цифры у кривых соответствуют номерам образцов в таблице 1

Во всех образцах при $T = 4,2$ К наблюдались осцилляции магнетосопротивления (эффект Шубникова–де Гааза). В качестве примера на рис. 3 приведены осцилляции

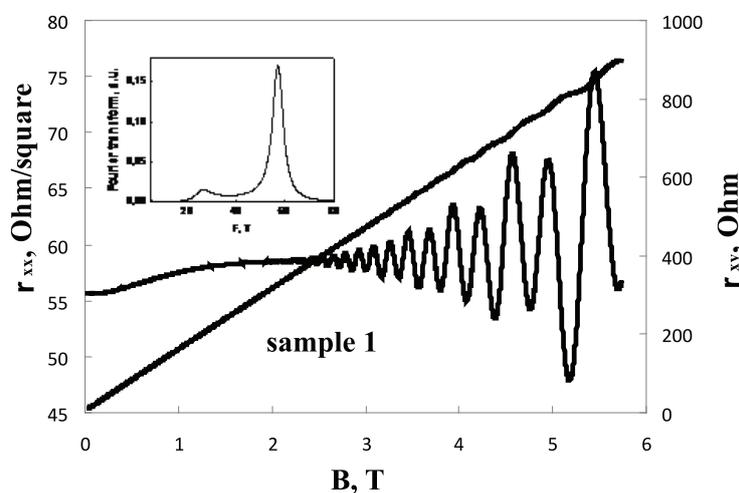


Рис. 3. Зависимость магнетосопротивления $\rho_{xx}(B)$, холловского сопротивления $\rho_{xy}(B)$ от магнитного поля B , Фурье-спектр осцилляций (вставка).

Расчёт зонной структуры, волновых функций, квантовой и транспортной подвижностей электронов

Методом самосогласованного решения уравнения Шрёдингера и уравнения Пуассона в приближении эффективной массы были получены профиль дна зоны проводи-

Шубникова–де Гааза, их Фурье-спектры и осцилляции холловского сопротивления для образца 1.

По графикам зависимостей сопротивления $\rho_{xx}(B)$ от магнитной индукции B видно, что у данных структур (кроме образца 4) наблюдаются две частоты Шубникова–де Гааза, то есть заполнены две подзоны размерного квантования. Были определены частоты и по ним концентрации электронов N_{sdH} (см. табл. 1). По зависимостям холловского сопротивления от магнитной индукции $\rho_{xy}(B)$ были рассчитаны холловские концентрации N_{Hall} и подвижности μ_{Hall} двумерных электронов. Эти величины также приведены в табл. 1, из которой видно, что сумма концентраций электронов в первой и второй подзонах, полученных из эффекта Шубникова–де Гааза, и концентрации, полученной из эффекта Холла, совпадают для всех образцов. Значение подвижности электронов у структуры с более широкой вставкой увеличилось по сравнению со значением подвижности у структуры без вставки и с узкой вставкой InAs. Подвижности электронов у образца с квантовой ямой (состоящей только из InAs) и образца с квантовой ямой InGaAs без вставки близки. То есть подвижность носителей заряда зависит от ширины вставки в квантовой яме, и она максимальна для вставки InAs шириной 31,4 Å.

мости, уровни энергии и волновые функции электронов. Метод расчёта и используемые параметры приведены в работах [11–13]. На рис. 4 представлены результаты расчётов для образца 3 с оптимальной шириной центральной вставки InAs. Как видно из рис. 4, действительно ниже уровня Ферми

в квантовой яме находится два уровня размерного квантования. Наличие центральной вставки InAs в квантовую яму приводит к тому, что уровень размерного квантования E_1 опускается ближе ко дну квантовой ямы. Он в основном формируется вставкой. Эффективная ширина квантовой ямы, определяемая полушириной волновой функции, уменьшается. Расстояние между первым E_1 и вторым E_2 уровнями энергии возрастает. Это приводит к увеличению электронной подвижности за счет ослабления межпод-

зонного рассеяния. В то же время возрастает рассеяние на неоднородностях бокового рельефа, что несколько понижает подвижность. Но в целом при оптимальной толщине вставки подвижность электронов возрастает. Вставка InAs сжата по сравнению с изоморфными слоями $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$. Существует предельная ширина такой вставки, выше которой появятся дефекты. Как видно из табл. 1, максимальная электронная подвижность наблюдается в образце 3 со вставкой InAs в квантовой яме шириной 31,4 Å.

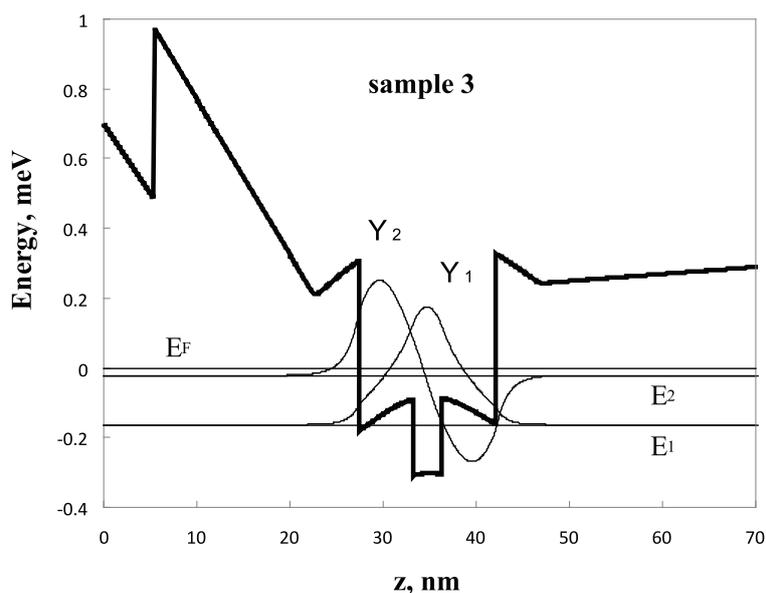


Рис. 4. Профиль дна зоны проводимости, уровни энергии и волновые функции электронов для образца 3. Энергия отсчитывается от уровня Ферми E_F , E_1 и E_2 – уровни размерного квантования

Одним из важных методов изучения механизмов рассеяния электронов в квантовых ямах является исследование транспортного τ_t и квантового τ_q времен рассеяния электронов или квантовой $\mu_q = \frac{e\tau_q}{m^*}$ и транспортной $\mu_t = \frac{e\tau_t}{m^*}$ подвижностей электронов [11–13]. Обе подвижности могут быть найдены либо из осцилляционной зависимости продольного магнетосопротивления в квантующем магнитном поле – эффекта Шубникова–де Гааза, либо прямыми расчетами [11–13]. При этом отношение μ_t/μ_q позволяет определить доминирующий характер рассеяния, определяющий электронную подвижность в квантовой яме. В одиночной квантовой яме AlGaAs/GaAs преобладает малоугловое рассеяние и $\mu_t/\mu_q \sim 10 - 100$. В гетероструктурах InAlAs/InGaAs на подложках InP, в основном, преобладает рассеяние на флуктуациях состава сплава и обычно $\mu_t/\mu_q \geq 1$.

Транспортную подвижность можно рассчитать в рамках кинетического уравнения, рассматривая рассеяние на примесях в борновском приближении. Для нескольких заполненных подзон теория обобщена в [14] (см. также ссылки [11–13]). Результаты расчетов представлены в табл. 2. Как видно из сравнения обеих подвижностей, транспортная подвижность существенно превышает квантовую, что свидетельствует о преобладающем характере малоуглового рассеяния, характерного для рассеяния электронов на ионизированной примеси. Как видно из рис. 4, это связано с тем, что волновые функции электронов заходят в дельта-слои легирующего кремния. Вторая особенность – расчетные подвижности превышают наблюдаемые экспериментально. Это в первую очередь связано с тем, что в расчетах не учтены дополнительные механизмы рассеяния в структурах со вставками, например рассеяние на латеральных неоднородностях.

Таблица 2
Квантовая μ_q и транспортная μ_t подвижности для первой и второй подзон размерного квантования

№ п/п	Номер подзоны	$\mu_q, \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	$\mu_t, \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
1	2	1600	108000
	1	2300	90100
2	2	800	22300
	1	5700	271000
3	2	800	19000
	1	5400	337000
4	1	1700	243000

Заключение

В работе были исследованы электронные подвижности в изоморфных квантовых ямах $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с центральной вставкой InAs различной толщины на подложках InP . Максимальная подвижность электронов наблюдается при ширине вставки $d = 31,4 \text{ \AA}$. Измерены и рассчитаны подвижности электронов в подзонах размерного квантования. Показано, что рассеяние на ионизированных примесях играет существенную роль в исследованных структурах.

Авторы благодарят Г.Б. Галиева, Е.А. Климова и И.С. Васильевского за предоставление образцов.

Список литературы

1. Ando Y., Itoh T. DC, Small-Signal, and Noise Modeling for Two-Dimensional Electron Gas Field-Effect Transistors Based on Accurate Charge-Control Characteristics, IEEE Trans. Electron. Dev., 1990, Vol. 31, no.1, pp. 67–78.
2. Bandy S., Nishimoto C., Hyder S., Hooper C. Saturation velocity determination for $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ field-effect transistors, Appl. Phys. Lett., 1981, Vol. 38, no. 10, pp. 817–819.
3. Hoyniaka D., Nowak E., Anderson R. L., Channel electron mobility dependence on lateral electric field in field-effect transistors, J. Appl. Phys., 2000, Vol. 87, no. 2, pp. 876–881.
4. Chen Y., Hsu W., Hsu R., Wu Y., Chen Y. Characteristics of $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ HEMT's with various $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ channels, Solid State Elect., 2004, Vol.48, pp. 119–124.
5. Hu J., Saraswa K., Wong H. Philip. Experimental demonstration of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ field effect transistors with scalable nonalloyed source/drain contacts, Appl. Phys. Lett., 2011, Vol. 98, pp. 062107–1-3.
6. Bollaert S., Cordier Y., Zakoune M., Happy H., Hoel V., Lepilliet S., Theron D., Cappy A. The indium content in metamorphic $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ HEMTs on GaAs substrate: a new structure parameter, Sol. St. Electron., 2000, Vol. 44, pp. 1021–1027.
7. Capotondi F., Biasiol G., Ercolani D., Sorba L., Scattering mechanisms in undoped $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}$ two-dimensional electron gases, J. Cryst. Growth, 2005, Vol. 278, pp. 538–543.
8. Kulbachinskii V.A., Lunin R.A., Vasil'evskii I.S., Galiev G.B., Mokerov V.G., Kaminskii V.E., Peculiarities of electron transport in the coupled $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ quantum wells with thin central barrier, Nanoscience, 2003, Vol.2, pp. 565–573.
9. Kulbachinskii V.A., Vasil'evskii I.S., Lunin R.A., Galistu G., de Visser A., Galiev G.B., Shirokov S.S. and Mokerov V.G., Electron transport and optical properties of shallow $\text{GaAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ quantum wells with a thin central AlAs barrier, Semicond. Sci & Technol., 2007, Vol. 22, pp. 222–228.

10. Akazaki T., Arai K., Enoki T., Ishii Y., Improved $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}$ HEMT characteristics by inserting an InAs layer into the InGaAs channel, IEEE Electron. Dev. Lett., 1992, Vol. 92, pp. 325–327.

11. Подвижности электронов в подзонах размерного квантования в комбинированно-легированных гетероструктурах $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ с высокой концентрацией 2D-электронов / В.А. Кульбачинский, Р.А. Лунин, В.Г. Кытин, А.С. Бугаев, А.П. Сеничкин // ЖЭТФ. – 1996. – Т. 110. – С. 1517–1524.

12. Низкотемпературные подвижности электронов в подзонах размерного квантования в комбинированно-легированных $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -гетероструктурах / Р.А. Лунин, В.Г. Кытин, В.А. Кульбачинский, Г.А. Миронова // Вестник МГУ, Серия 3 Физика, астрономия. – 1997. – № 4. – С. 31–34.

13. Транспортные и оптические свойства d-легированных оловом GaAs -структур / В.А. Кульбачинский, В.Г. Кытин, Р.А. Лунин, В.Г. Мокеров, А.П. Сеничкин, А.С. Бугаев, А.Л. Карузский, А.В. Пересторонин, R.T.F. van Schaijk, A. de Visser // ФТП. – 1999. – Т. 33. – № 7. – С. 839–846.

14. Sigga E.D., Kwok P.C. Properties of electrons in semiconductor inversion layers with many occupied electric subbands. I. Screening and impurity scattering. Physical Review B., 1970, Vol.2., pp. 1024–1036.

References

1. Ando Y., Itoh T. DC, IEEE Trans. Electron. Dev., 1990, Vol. 31, no.1, pp. 67–78.
2. Bandy S., Nishimoto C., Hyder S., Hooper C., Appl. Phys. Lett., 1981, Vol. 38, no. 10, pp. 817–819.
3. Hoyniaka D., Nowak E., Anderson R. L., J. Appl. Phys., 2000, Vol. 87, no. 2, pp. 876–881.
4. Chen Y., Hsu W., Hsu R., Wu Y., Chen Y., Solid State Elect., 2004, Vol. 48, pp. 119–124.
5. Hu J., Saraswa K., Wong H. Philip., Appl. Phys. Lett., 2011, Vol. 98, pp. 062107–1-3.
6. Bollaert S., Cordier Y., Zakoune M., Happy H., Hoel V., Lepilliet S., Theron D., Cappy A., Sol. St. Electron., 2000, Vol. 44, pp. 1021–1027.
7. Capotondi F., Biasiol G., Ercolani D., Sorba L., J. Cryst. Growth, 2005, Vol.278, pp.538-543.
8. Kulbachinskii V.A., Lunin R.A., Vasil'evskii I.S., Galiev G.B., Mokerov V.G., Kaminskii V.E., Nanoscience, 2003, Vol. 2, pp. 565–573.
9. Kulbachinskii V.A., Vasil'evskii I.S., Lunin R.A., Galistu G., de Visser A., Galiev G.B., Shirokov S.S. and Mokerov V.G., Semicond. Sci & Technol., 2007, Vol. 22, pp. 222–228.
10. Akazaki T., Arai K., Enoki T., Ishii Y., IEEE Electron. Dev. Lett., 1992, Vol. 92, pp. 325–327.
11. Kulbachinskii V.A., Lunin R.A., Kytin V.G., Bugaev A.S., Senichkin A.P. // ZETF, 1996, T. 110, pp. 1517–1524.
12. Lunin R.A., Kytin V.G., Kulbachinskii V.A., Mironova G.A. // Vestnik MGU, Seriya 3 Fizika, astronomiya, 1997, no. 4, pp. 31–34.
13. Kulbachinskii V.A., Kytin V.G., Lunin R.A., Mokerov V.G., Senichkin A.P., Bugaev A.S., Karuzskiy A.L., Perestoronin A.V., van Schaijk R. T. F., de Visser A. // FTP, 1999, T. 33, no. 7, pp. 839–846.
14. Sigga E.D., Kwok P.C., Physical Review B., 1970, Vol. 2, pp. 1024–1036.

Рецензенты:

Константинова Е.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры общей физики и молекулярной электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва;

Скипетров Е.П., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва.

Работа поступила в редакцию 22.02.2013.