

Гетероструктуры AlGaN/GaN с высокой подвижностью электронов, выращенные методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений

© В.В. Лундин[¶], Е.Е. Заварин, А.И. Бесюлькин, А.Г. Гладышев, А.В. Сахаров, М.Ф. Кокорев*, Н.М. Шмидт, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, Ж.И. Алфёров, Р. Каканаконв[†]

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

* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина),
Санкт-Петербург, Россия

[†] Институт прикладной физики Болгарской академии наук,
Пловдив, Болгария

(Получена 10 марта 2004 г. Принята к печати 16 марта 2004 г.)

Исследованы особенности газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений гетероструктур AlGaN/GaN. Получены структуры с двумерным электронным газом с подвижностью $1290 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{c})$ и концентрацией в канале $1.2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ (при комнатной температуре). Рассмотрено влияние чистоты исходных компонентов на параметры полученных слоев и гетероструктур.

1. Введение

В последнее время полевые транзисторы с высокой подвижностью носителей в канале (HEMT) на основе модулированно-легированных гетероструктур AlGaN/GaN являются объектом многочисленных исследований, проводимых в Японии, США и Европе [1–6]. Большие значения ширины запрещенной зоны, разрыва в зоне проводимости на гетерогранице AlGaN–GaN, напряжения пробоя и ряд других особенностей системы $\text{Al}^{\text{III}}\text{N}$ позволяют рассчитывать на создание транзисторов с параметрами, превосходящими достижимые в структурах на основе $\text{Al}^{\text{III}}\text{V}$. Сильные, порядка 10^6 В/см , встроенные пьезо- и пироэлектрические поля в гетероструктурах AlGaN/GaN позволяют при правильно выбранной геометрии структуры увеличить изгиб зоны проводимости на границе AlGaN/GaN и тем самым поднять концентрацию носителей в канале. Однако данная особенность, в сочетании с рассогласованием параметров кристаллической решетки, характерной для системы AlN–GaN, затрудняет оптимизацию геометрии приборных структур.

К настоящему времени транзисторы с высокой подвижностью носителей на основе GaN были продемонстрированы рядом исследовательских центров. Демонстрированы приборы с рабочими частотами в десятки ГГц и мощностью более 100 Вт [7]. Эти приборы в настоящее время уже выходят из стадии лабораторных исследований и в ближайшее время можно ожидать начала их массового производства. В то же время многие особенности как эпитаксиального роста, так и физических процессов, происходящих в модулированно-легированных гетероструктурах AlGaN/GaN, требуют тщательного изучения.

2. Эксперимент

Исследованные в рамках данной работы структуры выращивались на подложках сапфира с ориентацией (0001) методом газофазной эпитаксии разложением металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) в модифицированной установке Epiquip VP 50-RP при пониженном давлении. Установка оснащена горизонтальным кварцевым реактором с индуктивно нагреваемым графитовым подложкодержателем. В качестве газа-носителя использовался водород, в качестве исходных компонентов — аммиак, моносилан, триметилгаллий и триметилалюминий. Все указанные соединения — отечественного производства. В экспериментах использовался аммиак с различной, в соответствии с паспортными данными, степенью чистоты — 99.999% (в дальнейшем — 5N) и 99.9999% (в дальнейшем — 6N). Температура роста эпитаксиальных слоев составляла 1070°C . Подробные детали процесса эпитаксиального роста исследованных структур были опубликованы ранее [8].

Выращенные гетероструктуры представляли собой следующую последовательность слоев:

- нелегированный GaN толщиной 3 мкм,
- нелегированный $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ толщиной d_1 ,
- легированный кремнием $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ толщиной d_2 ,
- нелегированный GaN толщиной d_3 .

Толщины слоев d_1 , d_2 , d_3 и молярные потоки SiH_4 для исследованных структур представлены в таблице.

Выращенные структуры исследовались методом вольт-фарадных характеристик с использованием ртутного зонда. Подвижность и концентрация в данных образцах определялись с помощью холловских измерений методом Ван-дер-Пау. Численное моделирование исследованных структур производилось путем самосогласованного решения уравнений Пуассона и Шредингера с учетом встроенных пьезо- и пироэлектри-

[¶] E-mail: lundin.vpegroup@mail.ioffe.ru

Геометрия структур AlGaN/GaN и результаты холловских измерений

№ структуры	NH ₃	d ₁ , нм	d ₂ , нм	d ₃ , нм	SiH ₄ , нмоль/мин	300 К		77 К	
						μ, см ² /(В·с)	N _{2D} , 10 ¹³ см ⁻²	μ, см ² /(В·с)	N _{2D} , 10 ¹³ см ⁻²
1	6N	2.5	7.5	10	0.4	980	1.5	3460	1.6
2	6N	10	—	10	—	800	0.9	3050	0.8
3	6N	2.5	7.5	10	0.14	1209	1.1	5000	1.2
4	6N	5	15	10	0.4	990	2.1	2770	2.1
5	6N	12.5	7.5	10	0.4	900	1.9	3160	1.8
6	6N	2.5	7.5	10	0.3	1290	1.2	4800	1.3
7	5N	2.5	7.5	10	0.4	1060	1.5	4500	1.4
8	5N	10	—	10	—	660	1.6	3800	0.95

Примечание. Толщины слоев определены по результатам предварительных калибровок: d₁ — Al_{0.25}Ga_{0.75}N, d₂ — Al_{0.25}Ga_{0.75}N:Si, d₃ — GaN.

ческих полей с последующим расчетом вольт-фарядных характеристик (ВФХ) малосигнальным методом [8–10].

3. Результаты и обсуждение

Концентрации и подвижности электронов в выращенных структурах приведены в таблице и представлены на рис. 1 (в сравнении с опубликованными результатами других исследователей). Высокие значения подвижности, значительно превышающие значения подвижности носителей в эпитаксиальных слоях GaN, выращенных при тех же условиях, свидетельствуют о формировании двумерного электронного канала на гетерогранице GaN–AlGaN.

Для исследования влияния чистоты аммиака на электронные свойства слоев (Al)GaN и модулированно-легированных гетероструктур AlGaN/GaN были проведены исследования специально не легированных эпитаксиальных слоев GaN, выращенных с использованием аммиака марок 5N и 6N. Проведенные измерения показали, что концентрация $N_d - N_a$ в таких слоях составляет 10^{16} см⁻³ и 10^{14} см⁻³ соответственно. В нелегированных эпитаксиальных слоях AlGaN, выращенных с использованием аммиака марки 5N, фоновая концентрация $N_d - N_a$ не превышала уровня $5 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Такое значительное изменение фоновой концентрации в слоях (Al)GaN приводит к тому, что в нелегированных структурах AlGaN/GaN влияние чистоты аммиака на концентрацию носителей при комнатной температуре весьма значительно. Как следует из данных, полученных при измерении эффекта Холла, использование аммиака 5N вместо 6N приводит к двухкратному увеличению концентрации носителей в канале и к значительному падению подвижности при комнатной температуре (таблица, см. структуры 2 и 8). Снижение температуры измерений до 77 К практически не влияет на концентрацию носителей как в нелегированной структуре, выращенной с использованием аммиака 6N, так и на концентрацию носителей в легированных структурах. Однако концентрация носителей в нелегированной структуре, выращенной с использованием аммиака 5N, снижается

более чем в 1.5 раза при снижении температуры от 300 до 77 К. При этом разница в значениях концентрации и подвижности в структурах 2 и 8 не столь велика. Таким образом, данные результаты показывают, что использование аммиака 5N приводит к увеличению фонового легирования в слое GaN, что согласуется с данными для нелегированных слоев GaN, приведенных выше.

Легирование AlGaN кремнием при использовании аммиака 5N (структура 7) приводит к значительному (в 1.5 раза) увеличению концентрации носителей при $T = 77$ К по сравнению с нелегированной структурой 8. При этом при комнатной температуре наблюдается значительное увеличение подвижности носителей при практически неизменном значении концентрации. Данные результаты также подтверждают вывод о значительном вкладе в измеряемую проводимость шунтирующей проводимости в слое GaN при комнатной температуре в структуре 8. Проведенные эксперименты позволяют

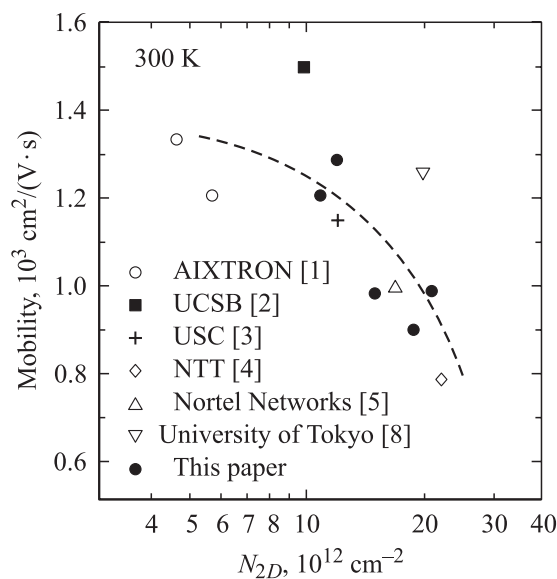


Рис. 1. Подвижность носителей в зависимости от их концентрации в структурах с двумерным электронным газом. Сравнение результатов, полученных в данной работе, с результатами, опубликованными другими авторами.

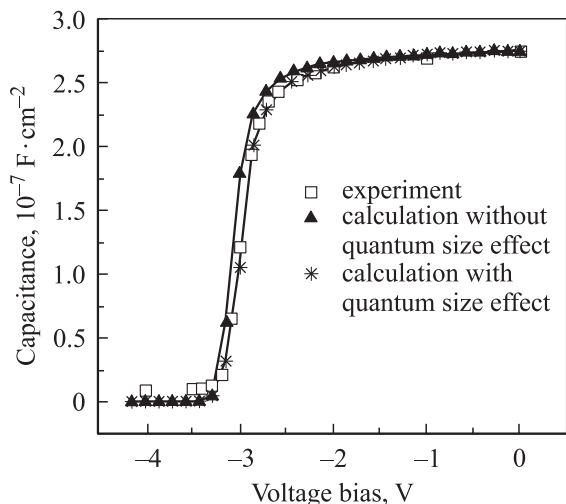


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные вольт-фарядные характеристики для структуры 2 (см. таблицу).

заклучить, что при использовании аммиака 5N контроль концентрации носителей с помощью легирования становится практически невозможным.

Следует отметить, что с использованием аммиака 5N ранее нами успешно выращивались различные типы светоизлучающих структур InGaN/GaN/AlGaIn [11], в том числе, с $p-n$ -переходами. Таким образом, структуры AlGaIn/GaN с двумерным электронным газом являются более чувствительными к чистоте используемого аммиака, чем светоизлучающие структуры.

Рассмотрение значений концентрации носителей тока и их подвижности в зависимости от параметров структуры показало, что концентрация носителей в канале зависит не только от уровня легирования и толщины легированного слоя, но и от толщины барьерного нелегированного слоя AlGaIn (структуры 1, 5). Увеличение толщины нелегированного слоя AlGaIn приводит к росту концентрации носителей и снижению подвижности в канале. Такое поведение может быть обусловлено различными причинами: ионизацией фоновых донорных примесей в слое AlGaIn либо увеличением эффективной ширины двумерного электронного канала, что приводит к распространению волновой функции электронов в слой GaN и, соответственно, к возрастанию рассеяния на фоновых примесях. При оптимальных параметрах структуры (толщины d_1-d_3 , уровень легирования) для образца 3 были получены значения подвижности, равные $5000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $T = 77 \text{ К}$.

Очевидно, что окончательная оптимизация транзисторной структуры возможна только на основании исследований готовых приборов. На основе выращенных структур были изготовлены прототипы транзисторов, показавшие возможность управления вольт-амперными характеристиками исток–сток путем изменения напряжения на затворе. Экспериментальная и расчетные (без и с учетом эффекта размерного квантования) ВФХ

представлены на рис. 2. Эффект размерного квантования оказывает влияние на форму ВФХ в области запираения канала. Результаты определения параметров структуры на основе моделирования структуры 2 демонстрируют высокую чувствительность метода ВФХ к изменению толщин слоев. В предположении эффективной высоты барьера $\Phi_B = 0.5 \text{ эВ}$ определенные толщины слоев имеют значения: $d_1 = 14.3 \text{ нм}$ и $d_3 = 12.7 \text{ нм}$, что несколько отличается от значений, заданных при росте структуры ($d_1 = d_3 = 10.0 \text{ нм}$). Расчетное значение концентрации двумерных электронов в канале составляет $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

4. Заключение

Таким образом, нами были выращены и исследованы гетероструктуры AlGaIn/GaN с высокой подвижностью носителей в канале. Сравнение полученных результатов с опубликованными данными показывает, что параметры структур находятся на уровне лучших мировых результатов. Показано также, что свойства таких структур в значительной степени зависят как от дизайна структуры, так и от чистоты используемых компонентов (аммиака).

Работа выполнена при поддержке программы научного сотрудничества между Российской и Болгарской академиями наук по теме № 57 „Новые гетероструктуры на основе AlGaIn/GaN для высокоомощной, высокотемпературной и высокочастотной микроэлектроники“, грантов „NATO за мир“ (SFP-972614), РФФИ (№ 01-02-18011, № 03-02-16657, № 01-02-17646) и грантами Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых и научных школ.

Список литературы

- [1] M. Marso, P. Javorka, A. Alam, M. Wolter, H. Hartdegen, A. Fox, M. Heuken, P. Kordos, H. Luth. Phys. Status Solidi (A), **188** (1), 199 (2001).
- [2] N. Zhang, B. Moran, S.P. DenBaars, U.K. Mishra, X.W. Wang, T.P. Ma. Phys. Status Solidi (A), **188** (1), 213 (2001).
- [3] G. Simin, A. Tarakji, X. Hu, A. Koudymov, J. Yang, M. Asif Khan, M.S. Shur, R. Gaska. Phys. Status Solidi (A), **188** (1), 219 (2001).
- [4] N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, N. Kobayashi. Phys. Status Solidi (A), **188** (1), 223 (2001).
- [5] Y. Liu, J.A. Bardwell, S.P. McAlister, H. Tang, J.B. Webb, T.W. MacElwee. Phys. Status Solidi (A), **188** (1), 233 (2001).
- [6] B. Shen, T. Someya, Y. Arakawa. Appl. Phys. Lett., **76** (19), 2746 (2001).
- [7] www.compoundsemiconductor.net/articles/news/7/12/12/1.
- [8] V.V. Lundin, A.V. Sakharov, A.F. Tsatsul'nikov, E.E. Zavarin, A.I. Besulkin, M.F. Kokorev, R.N. Kutt, V.Yu. Davydov, V.V. Tretyakov, D.V. Pakhnin, A.S. Usikov. Phys. Status Solidi (A), **188** (2), 885 (2001).
- [9] M.F. Kokorev, N.A. Maleev. Semicond. Sci. Technol., **15** (3), 301 (2000).

- [10] M.F. Kokorev, N.A. Maleev, D.V. Pakhnin, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov. *Proc. 9th Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“*, ed. by Zh. Alferov, L. Esaki (St. Petersburg, Russia, June 18–22, 2001) p. 230.
- [11] A.S. Usikov, W.V. Lundin, B.V. Pushnyi, N.M. Schmidt, V.Yu. Davidov, A.V. Sakharov, T.V. Shubina, A.A. Toropov, N.N. Faleev, M. Shcheglov, A.F. Tsatsul'nikov. *Proc. 7th Int. Conf. on Silicon Carbide, III nitrides and Related Materials–97* (Stockholm, Sweden, September 1997) pt 2, p. 1393.

Редактор Т.А. Полянская

High electron mobility AlGaIn/GaN heterostructures grown by metalorganic chemical vapour deposition

W.V. Lundin, E.E. Zavarin, A.I. Besulkin,
A.G. Gladishev, A.V. Sakharov, M.F. Kokorev*,
N.M. Schmidt, A.F. Tsatsul'nikov, N.N. Ledentsov,
Zh. I. Alferov, R. Kakanakov⁺

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

* V.I. Ul'yanov (Lenin) St. Petersburg State
Electrotechnical University,
St. Petersburg, Russia

⁺ Institute of Applied Physics,
Bulgarian Academy of Sciences,
Plovdiv, Bulgaria

Abstract Peculiarities of AlGaIn/GaN heterostructures MOCVD growth were investigated using precursors with different purity. Structures with 2D-electron gas have shown the mobility of $1290 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ and the channel concentration of $1.2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ at room temperature. The influence of the precursors purity on structure properties is also studied.