

Исследование туннельных диодов GaAs:Si/GaAs:C, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии

© Д.А. Винокуров[¶], М.А. Ладугин*, А.А. Мармалюк*, А.А. Падалица*, Н.А. Пихтин, В.А. Симаков*, А.В. Сухарев*, Н.В. Фетисова, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов

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

* ФГУП НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стальмаха,
117342 Москва, Россия

(Получена 3 марта 2009 г. Принята к печати 10 марта 2009 г.)

Определены технологические режимы для создания высокоэффективных туннельных структур GaAs:Si/GaAs:C методом МОС-гидридной эпитаксии. Продемонстрировано, что использование легирующих примесей С и Si позволяет получить $p-n$ -переход с малым диффузионным размытием профилей легирующих примесей. Показано, что для создания высокоэффективных туннельных диодов необходимо легирование слоев GaAs акцепторной и донорной примесью до уровня $\sim 9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. На основе созданных туннельных структур изготовлены туннельные диоды и исследованы их вольт-амперные характеристики. В туннельных диодах достигнуты значения плотности пикового тока $J_p \approx 1.53 \text{ кА/см}^2$ и при обратном смещении дифференциальное сопротивление $R \approx 30 \text{ МОм}$.

PACS: 85.30.Mn, 73.40.Gk, 73.40.Kp, 81.15.Ch

1. Введение

В настоящее время полупроводниковые лазерные диоды находят широкое применение в различных областях науки и техники. Поэтому происходит постоянное усовершенствование характеристик лазерных диодов — увеличение их оптической мощности, яркости, эффективности и срока службы.

Одним из способов повышения оптической мощности является создание лазерных источников на основе туннельно-связанных лазерных гетероструктур. Такие структуры представляют собой набор из N лазерных гетероструктур, последовательно выращенных в одном технологическом процессе. Впервые такие структуры были предложены Ziel и Tsang [1]. Аналогичные разработки проводились еще несколькими группами исследователей [2–4]. Особенностью таких туннельно-связанных лазерных гетероструктур является то, что при приложении к ним внешнего прямого напряжения каждый $p-n$ -гетеропереход в лазерной структуре смещен в прямом направлении, в то время как промежуточные туннельные $p-n$ -переходы между лазерными структурами смещены в обратном направлении. Для обеспечения эффективного протекания тока через обратно смещенный $p-n$ -переход необходимо создать условия для туннелирования носителей заряда через потенциальный барьер, что достигается введением сильно легированных p - и n -слоев в области смены типа проводимости. В работах [2–5] было показано, что при создании высокоэффективных туннельных $p-n$ -переходов в туннельно-связанных лазерных диодах происходит увеличение рабочего напряжения и дифференциальной

квантовой эффективности в N раз, в то время как рабочий ток почти не изменяется.

Стоит отметить, что туннельный $p-n$ -переход в указанных туннельно-связанных лазерных гетероструктурах является ключевым элементом и его электрические характеристики определяют работу всего прибора в целом.

Цель данной работы состояла в разработке технологии МОС-гидридной эпитаксии структур с $p-n$ -переходом на основе GaAs, обладающих высоким туннельным эффектом, и исследовании основных характеристик туннельных диодов на их основе.

2. Выбор технологических условий для создания туннельного $p-n$ -перехода в GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии

Структуры с туннельным $p-n$ -переходом выращивались на установке МОС-гидридной эпитаксии „СИГМОС-130“ с горизонтальным реактором. Процесс роста осуществлялся при пониженном давлении (65 Торр). Рост происходил на подложках n -GaAs (100).

Для обеспечения туннельного эффекта необходимо выполнение следующих требований.

1. Образующие $p-n$ -переход материалы должны быть вырождены, т. е. должно выполняться условие

$$N_A > N_V, \quad N_D > N_C, \quad (1)$$

где N_A , N_D — концентрация акцепторов и доноров соответственно; N_V , N_C — эффективная плотность состояний валентной зоны и зоны проводимости соответственно.

[¶] E-mail: dmitry.vinokurov@mail.ioffe.ru

Значение N_V можно вычислить, согласно [6], по следующей формуле:

$$N_V = 2.5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m_p}{m_0} \right)^{3/2} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

$$m_p = [m_{ph}^{3/2} + m_{pl}^{3/2}]^{2/3}, \quad (3)$$

где m_p — эффективная масса дырок, m_0 — масса покоя электрона, T — температура, m_{ph} , m_{pl} — эффективная масса тяжелых и легких дырок соответственно.

Значение N_C можно вычислить, согласно [6], по следующей формуле:

$$N_C = 2.5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m_n^\Gamma}{m_0} \right)^{3/2} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2}, \quad (4)$$

где m_n^Γ — эффективная масса электронов в минимуме Γ зоны проводимости, T — температура.

Для создания структуры с туннельным p – n -переходом нами в качестве эпитаксиальных слоев было выбрано бинарное соединение GaAs. Для GaAs значения N_V , N_C при температуре 300 К, вычисленные по формулам (2) и (4), составили $N_V \approx 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $N_C \approx 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, для обеспечения вырождения дырочного или электронного газа необходимо залегировать GaAs выше указанных значений.

2. Также необходимым условием для туннелирования носителей заряда является малая толщина потенциального барьера, которая зависит от концентрации легирующей примеси (чем выше концентрация, тем уже потенциальный барьер). Для эффективного туннелирования носителей заряда через потенциальный барьер необходима ширина перехода около 100 Å [7].

Для оценки можно рассчитать ширину p – n -перехода по формуле, приведенной в [8]:

$$d = \left(\frac{2\epsilon\epsilon_0\phi(N_A + N_D)}{qN_A N_D} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где d — ширина p – n -перехода, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, ϕ — контактная разность потенциалов, q — заряд электрона.

Исходя из формулы (5) при концентрациях N_A , $N_D = 6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ толщина d для GaAs составляет 100 Å. Таким образом, для обеспечения малой толщины потенциального барьера необходимо легировать GaAs выше расчетного значения $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

3. Для эффективного туннелирования необходимо обеспечить высокую резкость p – n -перехода. В нашем случае необходимо обеспечить малое диффузионное размытие профилей для легирующих примесей.

Для выполнения данного условия необходимо использовать в качестве легирующей примеси элементы, обладающие низким коэффициентом диффузии. В качестве легирующих примесей, удовлетворяющих этому условию, нами были выбраны кремний (Si — донорная

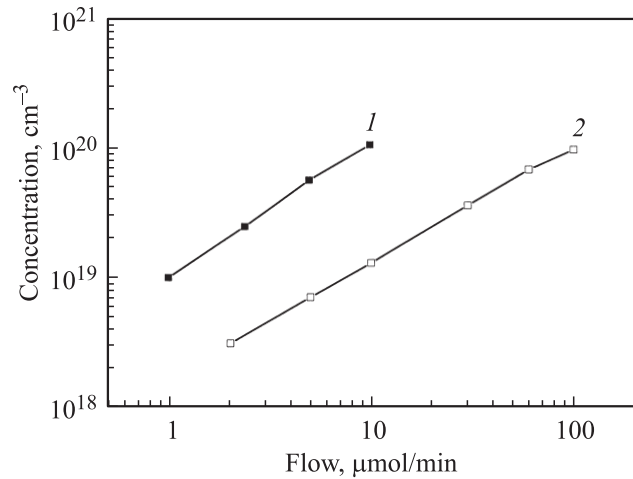


Рис. 1. Зависимости изменения атомной концентрации легирующей примеси Si (кривая 1) и C (кривая 2) в слое GaAs от величины потока SiH₄ ($T_{gr} = 770^\circ\text{C}$) и CCl₄ ($T_{gr} = 550^\circ\text{C}$).

примесь) и углерод (C — акцепторная примесь). Источниками легирующей примеси были выбраны моносилан (SiH₄) и тетрахлорид углерода (CCl₄) соответственно. Следует отметить, что легирование углеродом можно осуществлять также методом автолегирования [9–11].

Для выбора оптимальных условий проведения технологического процесса эпитаксии нами были проведены исследования концентрации легирующей примеси Si и C в GaAs от величины потока SiH₄ и CCl₄, а также от температуры роста. Атомная концентрация примесей Si и C определялась при помощи ВИМС-измерений.

На рис. 1 приведены зависимости изменения атомной концентрации Si (кривая 1) и C (кривая 2) в GaAs от величины потока SiH₄ (температура роста $T_{gr} = 770^\circ\text{C}$) и CCl₄ ($T_{gr} = 550^\circ\text{C}$) в газовой фазе соответственно. Концентрация обеих примесей в GaAs возрастает с увеличением потока в газовой фазе. Следует отметить, что одна и та же величина концентрации в GaAs достигается для Si при существенно более низких значениях потоков в газовой фазе, чем для C. Это связано, по нашему мнению, с большим значением коэффициента встраивания Si в GaAs, чем для C.

На рис. 2 приведены зависимости изменения концентрации Si (кривая 1) и C (кривая 2) в GaAs от температуры роста при фиксированных потоках SiH₄ ≈ 10 мкмоль/мин и CCl₄ ≈ 60 мкмоль/мин. Увеличение температуры технологического процесса приводит к росту концентрации легирующей примеси Si в GaAs в отличие от акцепторной примеси C, для которой с ростом температуры наблюдалось снижение концентрации легирующей примеси. Также следует отметить, что для достижения высокой концентрации легирующей примеси Si в полупроводниковых слоях GaAs требуется проведение эпитаксиальных процессов при относительно высоких температурах (более 700°C) для увеличения степени пиролиза SiH₄ до атомарного Si и подавления

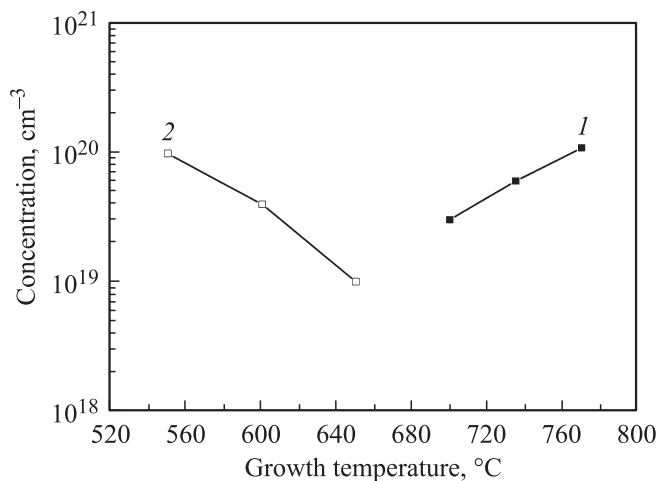


Рис. 2. Зависимости изменения атомной концентрации легирующей примеси Si (кривая 1) и C (кривая 2) в слое GaAs от температуры роста (SiH_4 , 10 мкмоль/мин; CCl_4 , 60 мкмоль/мин).

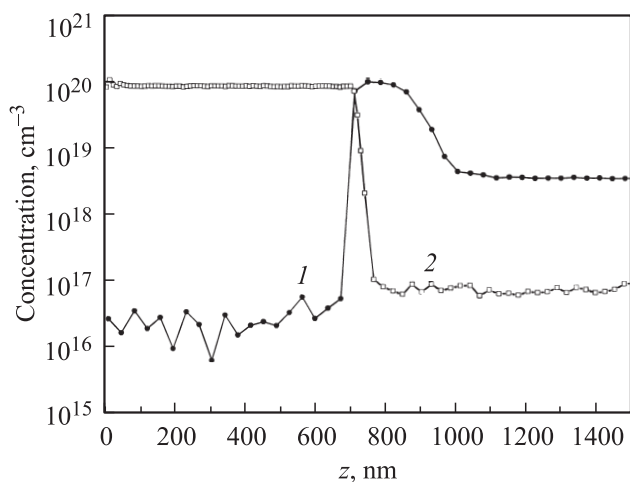


Рис. 3. Профили распределения легирующих примесей Si (кривая 1) и C (кривая 2) в туннельной структуре GaAs:Si/GaAs:C.

встраивания Si (амфорная примесь) в подрешетку мышьяка в GaAs. Для достижения высоких уровней концентрации C в GaAs необходимы более низкие температуры (менее 600°C) проведения эпитаксиальных процессов.

Из анализа зависимостей, представленных на рис. 1 и 2, нами были определены технологические условия, необходимые для создания высокоэффективного туннельного $p-n$ -перехода. Для слоя GaAs:Si были выбраны следующие параметры: $T_{\text{gr}} = 770^\circ\text{C}$ и поток SiH_4 , равный 10 мкмоль/мин, а для слоя GaAs:C — $T_{\text{gr}} = 550^\circ\text{C}$ и поток CCl_4 , равный 60 мкмоль/мин.

Согласно выбранным технологическим условиям была выращена туннельная структура GaAs:Si/GaAs:C и проведены исследования распределения по толщине легирующих примесей вблизи $p-n$ -перехода методом глу-

бинного профилирования с помощью вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС).

На рис. 3 приведены профили распределения примесей Si (кривая 1) и C (кривая 2) в туннельной структуре GaAs:Si/GaAs:C. Концентрации легирующих примесей вблизи металлургической границы составили для Si и C около $9 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Из распределения легирующих примесей по толщине видно, что диффузионное размытие для обеих примесей является незначительным (около 80 \AA), что свидетельствует о высокой резкости $p-n$ -перехода.

3. Исследование вольт-амперных характеристик туннельного $p-n$ -перехода GaAs:Si/GaAs:C

Из выращенных туннельных структур GaAs:Si/GaAs:C были изготовлены туннельные диоды. Полученные структуры утоньшались со стороны подложки n -GaAs до толщины 100 мкм, на них наносились и вжигались омические контакты. Затем из структуры выкалывались образцы, которые напаивались на медный теплоотвод и монтировались на измерительный стенд. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) производились при температуре 300 К.

На рис. 4 приведена типичная ВАХ туннельного диода (размер образца $230 \times 340 \text{ мкм}$). Значение плотности пикового тока (J_p) на прямой ветви ВАХ туннельного диода достигало 1.53 kA/cm^2 . Данное значение J_p находится на уровне лучших известных нам достижений [2], что свидетельствует о высоком качестве туннельного диода. Величина плотности пикового тока туннельного диода, полученного при легировании углеродом методом автолегирования, представленная в работе [11], составляла 207 A/cm^2 , что связано, по-видимому, с исполь-

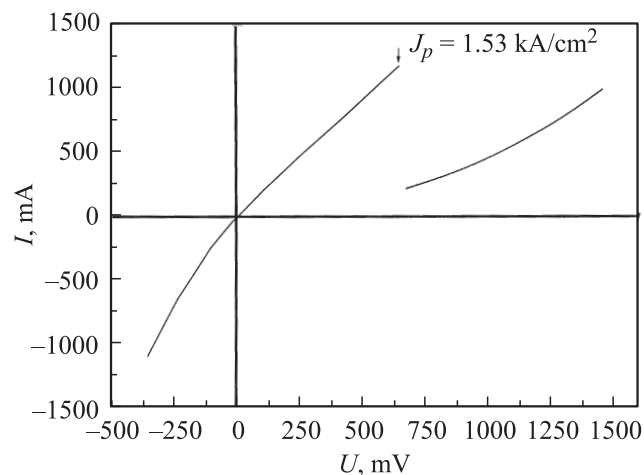


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика туннельного диода на основе структуры GaAs:Si/GaAs:C (размер образца $230 \times 340 \text{ мкм}$).

зованием в качестве p -контакта широкозонного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$:С.

Из наклона обратной ветви ВАХ при больших значениях токов (больше 6 А), что соответствует рабочим токам в мощных лазерных диодах, было оценено значение дифференциального сопротивления (R) туннельного диода при обратном смещении, которое составило $R \approx 30$ мОм (470×830 мкм). Следует отметить, что полученное значение сопротивления ниже, чем типичные значения для одиночных лазерных диодов, имеющих аналогичную площадь для протекания тока (около 40 мОм) [12].

4. Заключение

Определены технологические условия легирования кремнием и углеродом слоев GaAs, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, обеспечивающие высокий уровень легирования, необходимый для создания высокоэффективного туннельного диода.

Показано, что для достижения туннельного эффекта необходимо легирование слоев GaAs акцепторной и донорной примесью до уровня $9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Продемонстрировано, что использование в качестве легирующих акцепторной (С) и донорной (Si) примесей позволяет получить резкий p - n -переход из-за малого диффузионного размытия профилей обеих легирующих примесей.

Методом МОС-гидридной эпитаксии выращены туннельные структуры GaAs:Si/GaAs:С и исследованы вольт-амперные характеристики туннельных диодов, изготовленных на их основе. В туннельных диодах достигнуты значения плотности пикового тока $J_p \approx 1.53 \text{ кА/см}^2$ и дифференциальное сопротивление при обратном смещении $R \approx 30$ мОм.

Авторы выражают благодарность за проведение ВИМС-исследований Б.Я. Беру.

Работа выполнена при поддержке государственного контракта № 02.513.12.3011.

Список литературы

- [1] J.P. van der Ziel, W.T. Tsang. Appl. Phys. Lett., **41** (6), 499 (1982).
- [2] J.Ch. Garsia, E. Rosencher, Ph. Collot, N. Laurent, J.L. Guyaux, B. Vinter, J. Nagle. Appl. Phys. Lett., **71** (26), 3752 (1997).
- [3] S.G. Patterson, G.S. Petrich, R.J. Ram, L.A. Kolodziejski. Electron. Lett., **35**, 395 (1999).
- [4] C. Hanke, L. Korte, B.D. Acklin, M. Behringer, G. Herrmann, J. Luff, B. De Odorico, M. Marchiano, J. Wilhelmi. Proc. SPIE, **3947**, 50 (2000).
- [5] S.G. Patterson, E.K. Lau, K.P. Pipe, R.J. Ram. Appl. Phys. Lett., **77** (2), 172 (2000).
- [6] Х. Кейси, М. Паниш. *Лазеры на гетероструктурах* (М., Мир, 1981) т. 1, с. 234. [Пер. с англ.: Н.С. Casey, М.В. Panish. *Heterostructure lasers* (N.Y. San Francisco-London, Academic Press, 1978) v. 1].
- [7] В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. *Полупроводниковые приборы* (М., Высш. шк., 1987) с. 177.
- [8] И.М. Викулин, В.И. Стафеев. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Сов. радио, 1980) с. 10.
- [9] N. Watanabe, H. Ito, T. Ishibashi. J. Cryst. Growth, **147**, 256 (1995).
- [10] H. Li, F. Reinhardt, S. Macomber. J. Cryst. Growth, **256**, 52 (2003).
- [11] В.М. Лантратов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Андреев. ФТП, **41** (6), 751 (2007).
- [12] Д.А. Винокуров, С.А. Зорина, В.А. Капитонова, А.В. Мурашова, Д.Н. Николаев, А.Л. Станкевич, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Т.А. Налет, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, И.С. Тарасов. ФТП, **39** (3), 388 (2005).

Редактор Т.А. Полянская

Investigation of GaAs:Si/GaAs:C tunnel diodes grown by MOCVD

D.A. Vinokurov, M.A. Ladugin*, A.A. Marmalyuk*, A.A. Padalitsa*, N.A. Pikhtin, V.A. Simakov*, A.V. Sukharev*, N.V. Fetisova, V.V. Shamakhov, I.S. Tarasov

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

* Polyus Research & Development Institute,
117342 Moscow, Russia

Abstract Technological regimes for the creation high efficiency GaAs:Si/GaAs:C tunnel-junction structures by metal organic chemical vapor deposition have been determined. It has been demonstrated that C and Si dopants species allow obtaining p - n junction with low dopant diffusion. It has been shown, that for creation of high efficiency tunnel diodes the required donor and acceptor doping of GaAs layers have to reach $9 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ level. GaAs:Si/GaAs:C tunnel-junction structures have been grown by MOCVD. On their base tunnel diodes have been manufactured and their voltage-current characteristics have been studied. Peak current density $J_p \approx 1.53 \text{ кА/см}^2$ and differential resistance at reverse voltage $R \approx 30 \text{ м}\Omega$ have been attained.