

Использование амфотерности примесных атомов кремния для получения планарных $p-n$ -переходов на подложках GaAs с ориентацией (111)A методом молекулярно-лучевой эпитаксии

© Г.Б. Галиев, В.Э. Каминский[¶], В.Г. Мокеров, Л.Э. Велиховский

Институт радиотехники и электроники Российской академии наук,
103907 Москва, Россия

(Получена 31 июля 2000 г. Принята к печати 2 августа 2000 г.)

Выращены эпитаксиальные слои n - и p -типа проводимости. Показано, что морфология слоев p -типа проводимости значительно хуже морфологии слоев n -типа. Однако в обоих случаях спектры фотолюминесценции и подвижность носителей тока не сильно отличаются от аналогичных характеристик для монокристаллических образцов. Также получены планарные $p-n$ -переходы и изготовлены диоды. В зависимости от структуры слоев вольт-амперные характеристики приборов имеют вид обычного или обращенного диода.

1. Введение

Известно, что при легировании GaAs кремний может создавать как донорные (с энергией 6 мэВ), так и акцепторные (с энергией 35 мэВ) уровни. При эпитаксиальном росте GaAs на подложках с ориентацией (100) вне зависимости от условий роста легирование кремнием позволяет ввести только донорные уровни. Соответственно эпитаксиальные слои (ЭС) всегда имеют проводимость n -типа. В то же время эпитаксиальный рост на подложках с ориентацией (111)A позволяет получить ЭС обоих типов проводимости [1–3]. Это реализуется посредством изменений условий роста. Как известно, молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) обеспечивает высокую управляемость условиями роста ЭС. Необходимый тип проводимости ЭС достигается путем изменения соотношения потоков мышьяка и галлия $\gamma = P_{As}/P_{Ga}$, где P_{As} и P_{Ga} — парциальные давления паров As и Ga в зоне роста соответственно. При $\gamma \leq 20$ растут слои p -типа проводимости, а при $\gamma \geq 50$ — n -типа. При средних значениях $20 \leq \gamma \leq 40$ получаются частично или полностью компенсированные слои [2,3].

В литературе имеются сообщения о создании латеральных $p-n$ -переходов на GaAs при легировании только кремнием. Так, в [4] латеральные $p-n$ -переходы с размерами ~ 10 мкм создавались на подложках GaAs с ориентацией (100), но в канавках, сформированных с помощью фотолитографии и селективного травления в направлении (110). В этом случае за счет выбора селективного травителя в канавке образуется грань (111)A, где и формируется при МЛЭ область p -типа проводимости. В работах [5,6] сообщается о создании латеральных субмикронных областей с $p-n$ -переходами в GaAs с ориентацией (111)A при легировании кремнием. Здесь на поверхности подложек с помощью фотолитографии и селективного травления формировались эквиплоскостные треугольные области травления с гранями (111)A, (411)A [5] и (311)A [6], на которых при МЛЭ получались p - и n -области. Протяженность таких областей составля-

ла всего около ~ 10 мкм. Однако в литературе отсутствуют данные об эпитаксиально выращенных пленках GaAs с планарными $p-n$ -переходами, легированными только кремнием.

Данная работа посвящена изучению свойств ЭС p - и n -типа проводимости, выращенных на подложках с ориентацией (111)A, и диодных характеристик пленок, состоящих из ЭС обоих типов проводимости.

2. Приготовление образцов и методы измерений

Исследуемые образцы выращивались методом МЛЭ на полуизолирующих подложках с ориентацией (111)A. Для этого на молибденовый держатель с помощью индия приклеивались четыре образца с ориентацией (111)A и два образца с ориентацией (100). Последние два образца использовались как контрольные для сравнения концентрации и подвижности электронов и дырок в эпитаксиальных слоях. После роста нелегированного буферного слоя толщиной ~ 0.5 мкм выращивался легированный кремнием слой толщиной ~ 0.5 мкм при $\gamma = 77$ и температуре роста 600°C , когда, согласно [3], формируется n -слой. После этого рост прекращался, два образца с ориентацией (111)A и один образец с ориентацией (100) отклеивались. Эти образцы дальше использовались для исследования характеристик n -слоя. Далее на носитель приклеивались новые два образца с ориентацией (111)A и один образец с ориентацией (100) и проводился эпитаксиальный рост при $\gamma = 15$ слоя p -типа проводимости толщиной ~ 0.45 мкм. Таким образом, в результате двух процессов роста оказалось возможным вырастить образцы, содержащие как отдельные слои n - и p -типа проводимости (образцы 1 и 2 соответственно), так и образец с $p-n$ -переходом (образец 3). Концентрация, подвижность носителей и тип проводимости определялись методом Ван-дер-Пау. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) измерялись при $T = 77$ К в диапазоне энергий фотонов от 1.3 до 1.7 эВ. В качестве источника возбуждения использовался Ar^+ -лазер с длиной волны 514.5 нм и плотностью

[¶] E-mail: kamin@mail.cplire.ru

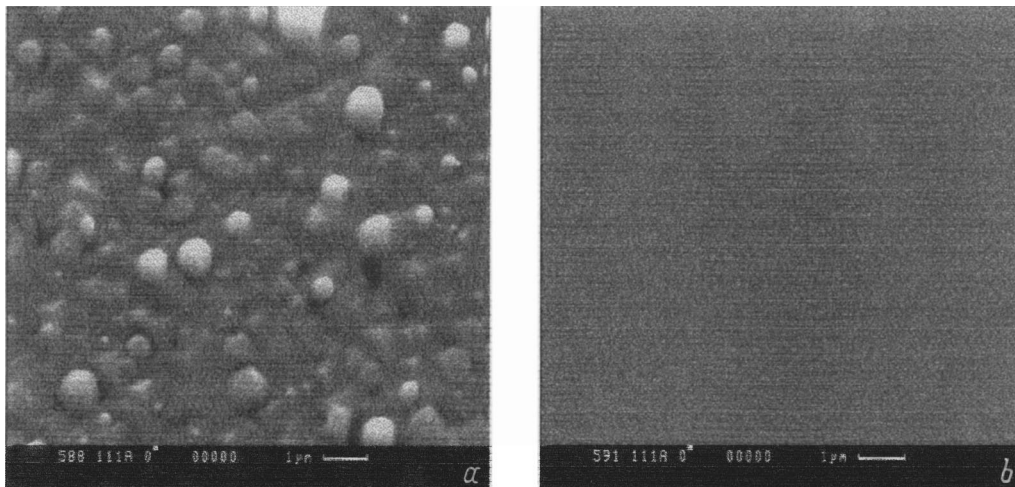


Рис. 1. Поверхности эпитаксиальных слоев p - (а) и n -типа (б) проводимости. Изображения получены в растровом электронном микроскопе.

излучения до 20 Вт/см^2 . Изображения поверхностей образцов получены с помощью растрового электронного микроскопа Cam Scan в режиме регистрации вторичных электронов при ускоряющем напряжении 30 кВ.

Для измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) p - n -переходов (образцы 3 и 4) с части образца стравливался верхний слой p -типа проводимости. Затем наносились омические контакты состава Au/Ti толщиной $\sim 0.2 \text{ мкм}$. Площадь квадратных контактов составляла $\sim 1 \text{ мм}^2$, а расстояние между ними — $\sim 5 \text{ мм}$.

3. Обсуждение результатов измерения электрофизических характеристик ЭС

На рис. 1 приведены изображения поверхностей слоев n - и p -типа проводимости, полученные в растровом электронном микроскопе. Как видно, слой p -типа отли-

чает развитый рельеф поверхности. Следствием этого является низкое кристаллическое совершенство слоя и, соответственно, наличие большого числа дефектов. Эти дефекты являются ловушками и центрами рассеяния для носителей тока. Их высокая концентрация оказывает существенное влияние на электрофизические характеристики слоев. Так, для образца 1 при концентрации электронов $\sim 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ подвижность была $\sim 2000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Для образца 2 при такой же концентрации дырок подвижность была $\sim 100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Измеренные подвижности в 1.5 и 2 раза, соответственно, меньше величин, характерных для монокристаллических образцов, выращенных на подложках с ориентацией (100).

На рис. 2 представлены спектры ФЛ образцов 1 и 2. Как видно, энергии максимумов полос излучения для переходов зона-зона сдвинуты в разные стороны относительно энергии, равной ширине запрещенной зоны $E_g = 1.507 \text{ эВ}$. Такое поведение спектров ФЛ характерно для сильно легированного GaAs и подробно изучено в [7]. Оно обусловлено одновременным влиянием двух факторов: сдвигом Бурштейна-Мосса и сужением запрещенной зоны. В материалах n -типа преобладает первый, а в материалах p -типа — второй. Кроме того, в спектрах ФЛ наблюдаются низкоэнергетические полосы, которые соответствуют [8] оптическим переходам между донором или акцептором и вакансией мышьяка. Разница энергий максимумов этих полос приблизительно равна разнице энергий донорного и акцепторного уровней кремния в GaAs.

4. Вольт-амперные характеристики p - n -переходов

На рис. 3 приведена ВАХ диода, изготовленного из образца 3, а на рис. 4 — из образца 4. Образец 3 имел параметры слоев образцов 1 и 2. А образец 4 отличается от образца 3 введением дополнительного

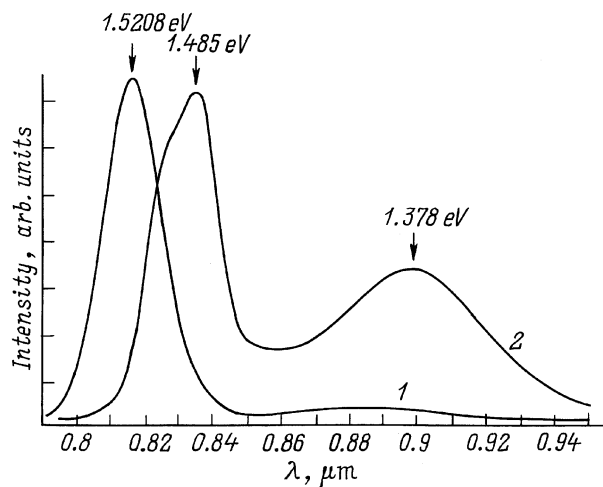


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции эпитаксиальных слоев n - (1) и p -типа (2) проводимости.

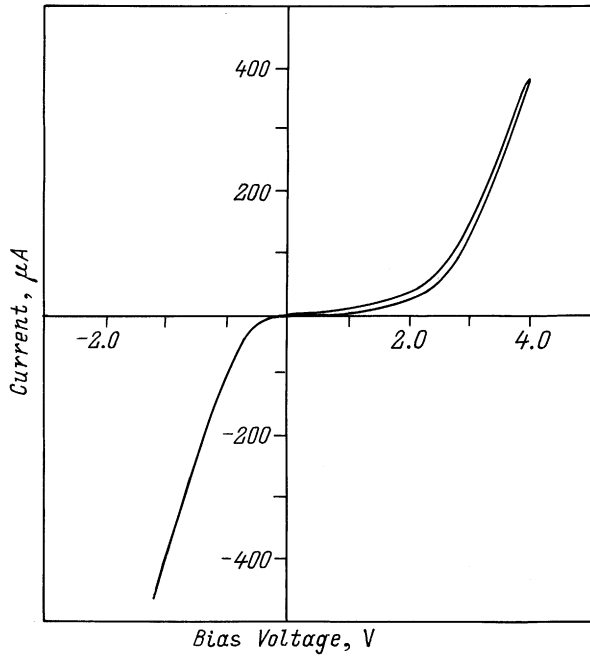


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика диода со структурой образца 3.

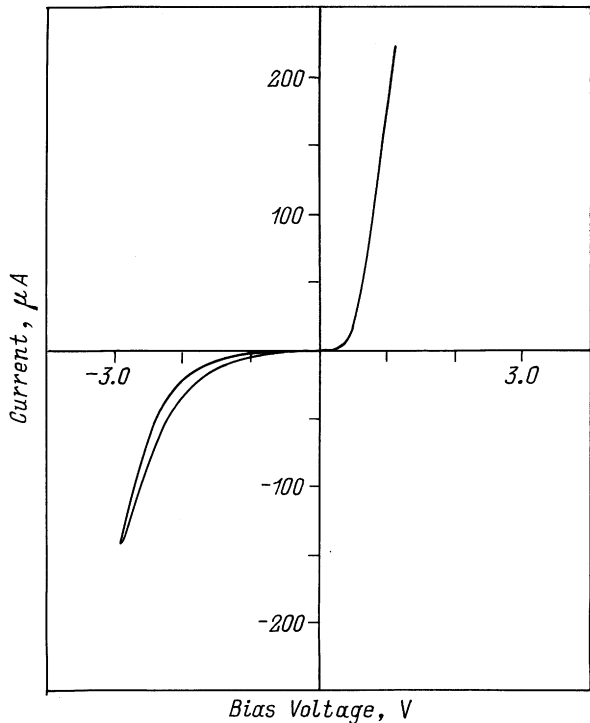


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика диода со структурой образца 4.

нелегированного слоя толщиной $d_i = 68$ нм между p - и n -слоями и более низкой концентрацией легирования слоев ($\sim 4.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Как видно из рисунков, ВАХ практически антисимметричны и сильно отличаются от

идеальных. Как известно [9], основными причинами отклонения ВАХ от идеальных являются: 1) генерация и рекомбинация носителей тока в обедненной области, 2) туннелирование носителей между состояниями в запрещенной зоне и между зонами, 3) высокий уровень инжекции, 4) влияние последовательного сопротивления.

Из экспериментальных ВАХ несложно определить, что последовательное сопротивление в обоих случаях приблизительно равно 3.3 кОм. Оно в основном определяется удельным сопротивлением n -слоя, его толщиной и расстоянием между омическими контактами. Величина последовательного сопротивления хорошо согласуется с данными холловских измерений. Отметим здесь, что эту величину можно значительно уменьшить, увеличивая толщину n -слоя. Как следует из рисунков, максимальная плотность тока в нашем случае не превышает 5 mA/cm^2 , т.е. измерения проведены в условиях низкого уровня инжекции. Таким образом, различие ВАХ определяется двумя первыми из перечисленных причин.

При прямом смещении и напряжении $U > \varphi_T = kT/q$ полный ток диода определяется соотношением [9]

$$J_F = q \sqrt{\frac{D_p n_i^2}{\tau_p N_D}} \exp\left(\frac{U}{\varphi_T}\right) + q \sigma v_T N_t \frac{W}{2} \exp\left(\frac{U}{2\varphi_T}\right), \quad (1)$$

где n_i — собственная концентрация носителей, σ — сечение захвата на ловушки, N_t — их концентрация, v_T — тепловая скорость, W — полная ширина обедненной области. Для образца 3 величина W совпадает с полной шириной обедненной области $p-n$ -перехода W_0 . Для образца 4 $W > W_0$ и, как несложно показать, определяется из соотношения $W^2 = W_0^2 + d_i^2$. Первое слагаемое в (1) представляет собой диффузионный ток, а второе — рекомбинационный. При обратном смещении и $|U| > 3\varphi_T$ полный ток можно приближенно представить в виде суммы диффузионного тока в нейтральной области, генерационного тока в обедненной области и туннельного тока:

$$J_R = q \sqrt{\frac{D_p n_i^2}{\tau_p N_D}} + \frac{q n_i W}{\tau_e} + J_T. \quad (2)$$

В GaAs величина n_i очень мала. Кроме того, как показано выше, морфологию ЭС для ориентации (111)А отличает значительный уровень несовершенства и, как следствие, большие значения N_t . Косвенно это подтверждает низкочастотный гистерезис на ВАХ. В силу этих причин для анализируемых переходов генерационно-рекомбинационная составляющая тока значительно больше диффузионной, которая квадратично зависит от n_i . В выращенных ЭС концентрации электронов и дырок близки к эффективной плотности состояний в зонах. Следствием этого является слабое вырождение носителей тока. В таких условиях существенным становится прямое межзонное туннелирование. Как известно,

величина

$$J_T \propto \exp\left(-\frac{\pi m^{1/2} E_g^{3/2} W}{2\sqrt{2}\hbar q \varphi_c}\right), \quad (3)$$

где φ_c — контактная разность потенциалов, которая в нашем случае приблизительно равна E_g/q . Как следует из (3), J_T быстро уменьшается с ростом W . Различие ВАХ образцов является следствием этой зависимости туннельного тока. Для полученных концентраций в образце $3 W_0 = 54$ нм. Туннельный ток при обратном смещении превышает рекомбинационный ток при прямом смещении и ВАХ является типичной для обращенного диода [9].

Для образца 4 $W_0 = 62$ нм и $W = 93$ нм. Последняя величина в 1.7 раза больше W_0 для образца 3. Из (3) следует, что J_T в (2) экспоненциально уменьшается в 10^{22} раз. В то же время величина рекомбинационного тока в (1) линейно растет с W . Вследствие этого туннельный ток становится существенным при более высоких напряжениях (~ 1.5 В) и ВАХ имеет вид, характерный для обычных диодов. Полученные результаты показывают, что посредством введения нелегированной области можно достаточно просто управлять характеристиками диода.

5. Заключение

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии нами были выращены ЭС n - и p -типа проводимости на подложках GaAs с ориентацией (111)A и исследованы их свойства. Морфология ЭС n -типа близка к морфологии слоев на подложках с ориентацией (100). В то же время морфологию слоев p -типа отличает значительное количество дефектов несовершенства. Однако электрофизические характеристики ЭС не сильно отличаются от монокристаллических образцов с таким же уровнем легирования. Нами также были получены планарные p - n -переходы и изготовлены диоды. В зависимости от структуры слоев ВАХ приборов имеют вид обычного или обращенного диода.

Авторы выражают признательность Ю.В. Хабарову за проведение измерений спектров фотолюминесценции.

Работа выполнена при финансовой поддержке по межотраслевой научно-технической программе России "Физика твердотельных наноструктур" проект № 97-1093/4.

Список литературы

- [1] Y. Okano, H. Seto, H. Katahama et al. Japan. J. Appl. Phys., **28**, L151 (1989).
- [2] F. Piazza, L. Pavesi, M. Henin, D. Johnston. Semicond. Sci. Technol., **7**, 1504 (1992).
- [3] В.Г. Мокеров, Г.Б. Галиев, Ю.В. Слепнев, Ю.В. Хабаров. ФТП, **32** 1320 (1998).
- [4] D.L. Miller. Appl. Phys. Lett., **47**, 1309 (1985).

- [5] M. Fujii, T. Takebe, T. Yamamoto et al. Superlat. Microstruct., **12**, 167 (1992).
- [6] K. Fujita, H. Ohnishi, M. Hirai et al. Sol. St. Electron., **40**, 663 (1996).
- [7] G. Borghs, K. Bhattacharyya, K. Deneffe et al. Appl. Phys., **66** 4381 (1989).
- [8] L. Pavesi, M. Guzzi. J. Appl. Phys., **75**, 4779 (1994).
- [9] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) Т. 1–2. Пер. с англ.: S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices* (N.Y.- Chichester–Brisbane–Toronto–Singapore, Wiley-Interscience Publication, 1981) v. 1–2

Редактор В.В. Чалдышев

Employment of Si dopant atom amphoteric property for growing planar p - n -junctions on GaAs substrates with (111)A orientation by molecular-beam epitaxy

G.B. Galiev, V.E. Kaminskii, V.G. Mokerov, L.E. Velikhovskii

Institute of Radio Engineering and Electronics,
Russian Academy of Sciences,
103907 Moscow, Russia

Abstract Epitaxial layers of n - and p -type conductivity are grown. It has been shown that morphology of p -type conductivity layers is significantly worse than that of n -type. However in both cases photoluminescence spectra and carrier mobility have no substantial difference with regard to the same characteristics for monocrystal samples. The planar p - n -junctions have been also grown and diodes were made. Depending on structure of layers, the volt-ampere characteristics have a form peculiar to ordinary or reversed diodes.