

Влияние обработки ионами Ar низких энергий на характеристики рабочей и тыльной сторон подложки монокристаллического GaAs

© А.С. Алапыкин[†], П.Н. Крылов, И.В. Федотова, А.Б. Федотов^{*††}

Удмуртский государственный университет,
426034 Ижевск, Россия

* Нижегородский государственный технический университет,
603024 Нижний Новгород, Россия

(Получена 10 июля 2002 г. Принята к печати 4 октября 2002 г.)

Бесконтактными методами исследованы характеристики рабочей и тыльной сторон подложек монокристаллического арсенида галлия, подвергнутого обработке тыльной стороны ионами аргона низких энергий. Обнаружены изменения оптических и фотоэлектрических свойств облучаемых и необлучаемых сторон. Предложен солитонный механизм проникновения дефектов в глубь кристалла.

1. Введение

В технологии современного производства широко используется обработка различных материалов пучками частиц. Облучение поверхности приводит к интенсивному росту различного вида дефектов, изменению структуры не только на облучаемой поверхности, но и на расстояниях от места облучения, в тысячи раз превышающих характерные длины поглощения первичного облучения. Такое явление получило название „эффекта дальнего действия“. Эффекты дальнего действия исследовались, например, в работах [1–4]. Эти эффекты можно разделить на две группы: продольные и поперечные. К поперечным эффектам следует отнести появление избыточных дефектов на поверхности, на некотором расстоянии от облучаемой области. Так, в работе [4] представлены результаты исследования влияния локального облучения ионами аргона на структуру, состав и свойства поверхностных слоев арсенида галлия в окрестности псевдограницы „облучаемая–(необлучаемая поверхность)“. Показано, что в необлучаемой области распределение появившихся дислокаций носит экстремальный характер. Максимум распределения дислокаций приходится на расстояние приблизительно 1.5 мм от границы.

В настоящей работе представлены результаты по продольному эффекту дальнего действия. Исследовано изменение оптических и электрофизических свойств обработанной и необработанной ионами аргона низких энергий сторон пластины монокристаллического арсенида галлия. Предложен механизм проникновения дефектов в глубь кристалла.

2. Методика эксперимента

Обработка легированных теллуром с концентрацией 10^{18} см^{-3} подложек GaAs производилась на установке „Сапфир“ [5]. Сила ионного тока разряда в ионном источнике „Радикал-80“ составляла $I = 0.6–0.7 \text{ А}$

при напряжении $U = 2000 \text{ В}$, средняя энергия ионов $300–400 \text{ эВ}$, предельный вакуум в камере $10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$ Напуск рабочего газа производился непосредственно в ионный источник.

Обработка подложек ионами аргона производилась в течение 10, 20, 30 и 45 мин. До и после обработки образцы исследовались бесконтактными методами.

На эллипсометре ЛЭФ-3М-1 сняты угловые зависимости параметров ψ и Δ для обработанной и необработанной сторон подложек. На спектрофотометре СФ-26 с приставкой для измерения отражения в ближней инфракрасной и видимой области света исследовалась спектральная зависимость коэффициента отражения. Бесконтактным высокочастотным (ВЧ) емкостным методом измерена спектральная зависимость фотопроводимости для обеих сторон образцов.

3. Результаты исследований

Исследования с помощью спектрофотометра СФ-26 показали, что спектры отражения рабочей и тыльной сторон подложек (рис. 1) до облучения различаются. Различаются также и характеры изменения спектров этих сторон после облучения. Для обрабатываемой (тыльной) стороны подложек после облучения наблюдается уменьшение коэффициента отражения, что свидетельствует об ухудшении „зеркальности“ поверхности, или об увеличении ее шероховатости. Спектр отражения и его изменения для необрабатываемой (рабочей) стороны подложек имеет более сложный характер. Согласно [6], отражение при очень коротких длинах волн должно определяться собственными свойствами вещества и не должно зависеть от примесей. В ближней ультрафиолетовой и видимой областях существенную роль играет поверхность. Из рис. 1 видно, что для необрабатываемой стороны после обработки тыльной поверхности наблюдается уменьшение коэффициента отражения в ближней инфракрасной области и увеличение коэффициента отражения в видимой области.

[†] E-mail: ftt@uni.udm.ru

^{††} E-mail: fabor@kis.ru

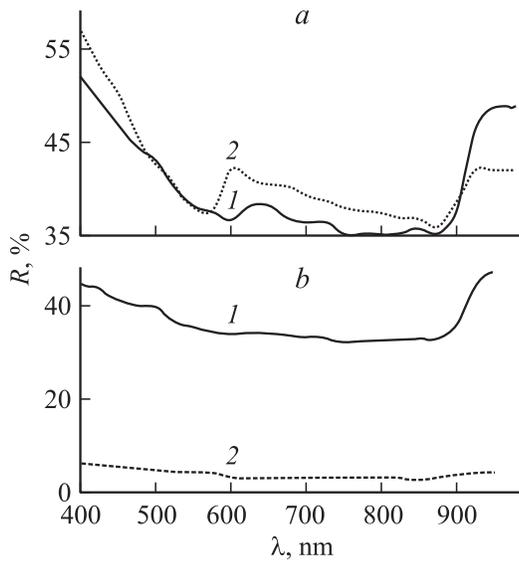


Рис. 1. Спектры отражения необрабатываемой (рабочей) стороны (а) и обрабатываемой (тыльной) стороны (б) образца: 1 — до обработки, 2 — после обработки; $t_{tr} = 10$ мин.

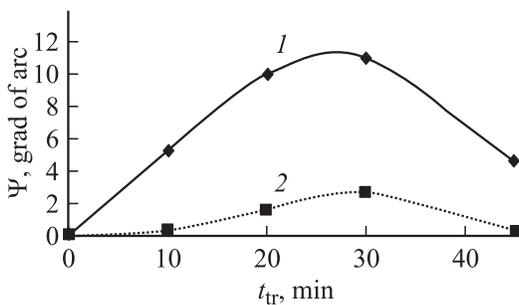


Рис. 2. Изменение эллипсометрического параметра ψ от времени обработки: 1 — обрабатываемая (тыльная) сторона, 2 — необрабатываемая (рабочая) сторона.

Таким образом, в результате облучения тыльной стороны подложек идет изменение свойств самого материала и изменение качества противоположной (рабочей) поверхности подложек. Следует отметить, что относительные изменения коэффициентов отражения во времени имеют максимальные значения при обработке в течение 10 мин. Это свидетельствует о сложном характере генерации и распада несовершенств как на обрабатываемой, так и на необрабатываемой стороне подложек.

Исследования, проведенные на эллипсометре ЛЭФ-3М-1, показали изменение эллипсометрического параметра ψ при угле Брюстера. Характер изменения данного параметра при измерениях на тыльной стороне совпадает с характером изменения параметра при измерениях на рабочей стороне (рис. 2), хотя изменения на рабочей (необрабатываемой) стороне меньше изменений на тыльной стороне.

Вполне очевидно, что необработанные поверхности почти не имеют нарушенного слоя, выполняется закон Брюстера, при этом угол между отраженным и преломленными лучами составляет 90° . Параметр ψ равен нулю. После облучения на поверхностях (рабочей и тыльной) начинают расти тонкие нарушенные слои, в которых дипольные моменты молекул ориентированы иначе, чем внутри подложек. Из-за этого отраженный свет при падении под углом, равном углу Брюстера, обнаруживает слабую эллиптическую поляризацию. Параметр ψ растет, достигая максимума при обработке в течение 30 мин.

Амплитуды колебаний компонент электрического вектора отраженной волны A_p и A_s (индекс p указывает на компоненту, параллельную плоскости падения, а индекс s — на компоненту, перпендикулярную ей) также изменяются после обработки подложек. Между значениями этих компонент после обработки появляется разница, что свидетельствует об анизотропности отражающей системы. Зависимости разности абсолютных значений этих компонент от времени обработки представлены на рис. 3.

Разность компонент для необрабатываемой (рабочей) стороны имеет первую точку перегиба при обработке подложек в течение 10 мин и максимум при времени обработки, равном 30 мин. Судя по временным зависимостям, при обработке на рабочей стороне подложек возникает анизотропный нарушенный слой, с течением времени анизотропия увеличивается, но достигает максимума при том же времени, при котором толщина нарушенного слоя достигает насыщения (см. рис. 2). После этого идет вторичная перестройка структуры.

На обрабатываемой стороне подложек максимальная анизотропия пленок наблюдается при времени обработки, равном 10 мин, что, вероятно, соответствует увеличению нарушенного слоя и обеднению этого слоя мышьяком. Далее расплывается галлий, концентрация элементов выравнивается. При этом возможно попадание галлия в нарушенный слой, из-за чего возникает новое увеличение анизотропии. Вполне вероятно, что при дальнейшем увеличении времени обработки такие изменения будут повторяться.

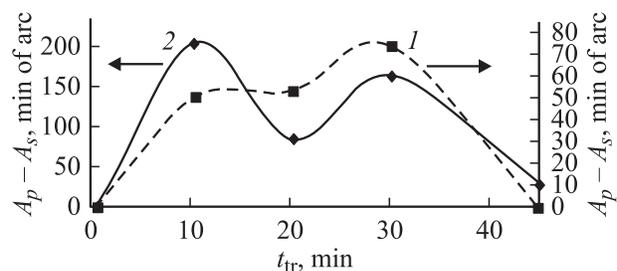


Рис. 3. Зависимости $(A_p - A_s)$ от времени обработки: 1 — необрабатываемая (рабочая) сторона, 2 — обрабатываемая (тыльная) сторона.

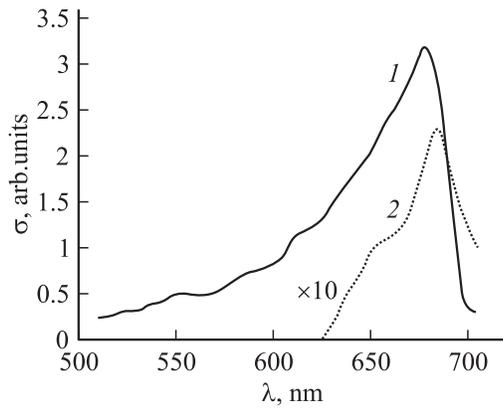


Рис. 4. Спектральные зависимости фотопроводимости обрабатываемой (тыльной) стороны GaAs: 1 — до обработки, 2 — после обработки; $t_{tr} = 10$ мин.

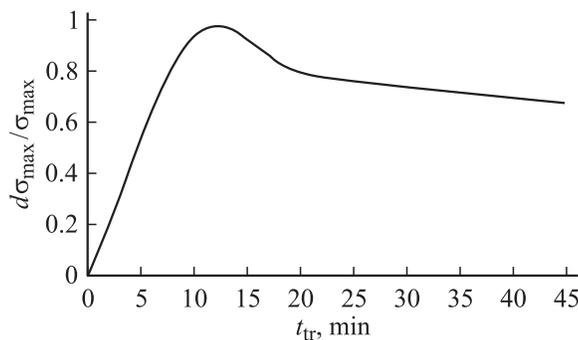


Рис. 5. Относительное изменение фотопроводимости в зависимости от времени обработки.

Характер изменения спектральной фотопроводимости рабочей стороны аналогичен характеру изменения спектральной фотопроводимости тыльной (рис. 4) стороны. Ионная обработка приводит к уменьшению фотопроводимости во всем спектральном диапазоне. Наиболее сильные изменения в области максимума кривой при длине волны $\lambda = 695$ нм. Относительное изменение фотопроводимости в зависимости от времени обработки имеет вид кривой с максимумом (рис. 5). Максимальное изменение σ (на 93% от исходного значения) происходит при обработке в течение 10 мин.

В работах [7,8] показано, что фотопроводимость субмикронных эпитаксиальных пленок n -GaAs имеет в основном поверхностную природу и может быть интерпретирована как изменение темновой проводимости за счет уменьшения ширины слоя при захвате фотодырок на поверхностные состояния. В работе [9] по результатам уменьшения фоточувствительности после механической обработки делается заключение, что в пленке возникает дополнительный канал рекомбинации, приводящий к уменьшению эффективного времени жизни. Считается, что наиболее вероятной причиной изменения электрофизических свойств эпитаксиальной пленки GaAs является миграция точечных дефектов из

нарушенного механической обработкой слоя. В нашем случае изменение фотопроводимости на обрабатываемой и необрабатываемой сторонах подложек также можно объяснить увеличением дефектности структуры.

4. Обсуждение результатов исследований

Таким образом, эллипсометрические и спектральные исследования показали, что изменение свойств подложек арсенида галлия при обработке ионами аргона связано с подвижностью структурных дефектов. Подвижность структурных дефектов, как известно [10], зависит от распределения точечных дефектов вокруг протяженных неоднородностей строения кристалла. Известно также [10], что протяженные дефекты кристаллической решетки (свободные поверхности, поры, трещины, границы зерен и блоков, отдельные дислокации с краевой компонентой) являются потенциальными источниками и стоками для вакансий. Положение, размеры и форма этих дефектов могут изменяться при поглощении или испускании вакансий.

В нашем случае также вполне закономерно возникновение на поверхности слоя, обогащенного вакансиями. Дальнейшее продвижение вакансий в глубь кристалла происходит за счет диффузии, осложненной генерацией–диссоциацией как дивакансий $V + V \leftrightarrow V_2$, так и тривакансий $V + V + V \leftrightarrow V_3$. Учет взаимодействия приводит к системе уравнений непрерывности в виде:

$$\partial N / \partial t = D \nabla^2 N - 2(A_1 N^2 - A_2 N_d) - 3(A_3 N_d N - A_4 N_t), \quad (1)$$

$$\partial N_d / \partial t = D_d \nabla^2 N_d + A_1 N^2 - A_2 N_d - A_3 N_d N + A_4 N_t, \quad (2)$$

$$\partial N_t / \partial t = A_3 N_d N - A_4 N_t, \quad (3)$$

где N_d и N_t — концентрация дивакансий и тривакансий соответственно; слагаемые $A_1 N^2$ и $A_3 N_d N$ — скорости генерации дивакансий и тривакансий, отнесенные к единице объема; $A_2 N_d$ и $A_4 N_t$ — скорости их диссоциации соответственно. Параметры A_1 – A_4 являются экспоненциальными функциями температуры и называются константами скоростей реакций генерации и диссоциации соответствующих дефектов [11].

В этой модели диффузионный поток тривакансий считается пренебрежимо малым по сравнению с диффузионными потоками вакансий и дивакансий. Пусть в некоторой области кристалла скорость генерации дивакансий равна скорости их диссоциации (локальное равновесие по дивакансиям). В этом случае должно выполняться условие $A_1 N^2 = A_2 N_d$. Поскольку N и N_d являются функциями координат r и времени t , это условие в сущности является уравнением движения в кристалле точки локального равновесия по дивакансиям $r = r(t)$ в неявном виде. Параметры A_i имеют вид $A_i = A_{i0} \exp(-\mu_i/kT)$, где A_{i0} — константы, μ_i — химические потенциалы

дефектов i -го сорта. Следовательно, для нахождения зависимости $r(t)$ имеем

$$\frac{A_{10}}{A_{20}} \exp\left(\frac{\mu_2 - \mu_1}{kT}\right) = \frac{N^2(r(t))}{N_d(r(t))}. \quad (4)$$

Естественно предположить, что вблизи данной координаты реакция генерации–диссоциации тривакансий далека от равновесия и, следовательно, $A_3N^3 \gg A_4N_i$. В результате система (1)–(3) принимает вид

$$\partial N / \partial t = D \nabla^2 N - 3A_3^* N^3, \quad (5)$$

$$\partial N_d / \partial t = D_d \nabla^2 N_d - A_3 N_d N, \quad (6)$$

$$\partial N_i / \partial t = A_3 N_d N, \quad (7)$$

где $A_3^* = A_3(A_1/A_2)$. В результате уравнение (5) приняло вид, допускающий солитонные решения. Следовательно, в данной области могут возникать солитонные волны вакансий. В этом случае скорость переноса вакансий будет определяться не диффузионным соотношением (1), а скоростью перемещения в кристалле области локального равновесия по дивакансиям.

5. Заключение

Таким образом, на обрабатываемой стороне в начальный период ионной обработки арсенида галлия происходит преимущественное распыление As, поскольку он имеет больший, чем у Ga коэффициент распыления. В результате чего на поверхности образца образуется нарушенный слой с достаточно большой концентрацией вакансий и обогащенный Ga. Поток вакансий и дивакансий перемещается в глубь кристалла. Начиная с момента времени обработки 10 мин, нарушенный (обедненный As) слой стравливается, приближаясь по своей структуре к исходному состоянию. Волны вакансий и дивакансий достигают необрабатываемой стороны подложки. При своем движении они взаимодействуют с линейными дефектами. В результате таких взаимодействий точечный дефект перемещается к дислокации и может быть поглощен ею, так что полностью аннигилирует на ней [12], но большая часть точечных дефектов достигает противоположной стороны подложек. Вакансии и их комплексы являются акцепторами [13,14], что приводит к снижению фотопроводимости, изменению эллипсометрического параметра ψ и изменению коэффициента отражения.

Список литературы

- [1] П.В. Павлов, В.И. Пашков, В.М. Генкин, Г.В. Камаева, В.П. Никишин, Ю.Н. Огарков, Г.И. Успенская. ФТТ, **15** (9), 2857 (1973).
- [2] В.А. Пантелеев, В.В. Черняховский, С.Н. Ершов. ФТТ, **16** (7), 2151 (1974).
- [3] Т.И. Кольченко, В.М. Ламако, И.Е. Марончук. ФТП, **15** (3), 580 (1981).

- [4] А.С. Алалыкин, А.А. Краснов, П.Н. Крылов, А.А. Стерхов, Ю.В. Рац. *Тр. IX Междунац. совещ. „Радиационная физика твердого тела“* (Севастополь, 1999) с. 132.
- [5] А.С. Акашкин, В.В. Бесогонов, В.М. Ветошкин, В.Ф. Кобзиев, П.Н. Крылов. *Вакуумная техника и технология*, **9** (2), 17 (1999).
- [6] Б.И. Бедный, А.Н. Калинин, И.А. Карпович. ФТП, **17** (7), 1302 (1983).
- [7] *Оптические свойства полупроводников (полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$)*, пер. с англ. под ред. Гросса (М., Мир, 1970).
- [8] Б.И. Бедный, А.Н. Калинин, И.А. Карпович, А.Н. Савинов. *Изв. вузов СССР. Физика*, **12**, 84 (1984).
- [9] Б.И. Бедный, С.Н. Ершов, В.А. Пантелеев. ФТП, **19** (10), 1806 (1985).
- [10] Б.Я. Любов. *Диффузионные процессы в неоднородных твердых средах* (М., Наука, 1981) с. 295.
- [11] Дж. Маннинг. *Кинетика диффузии атомов в кристаллах* (М., Мир, 1972).
- [12] С.А. Медведев. *Введение в технологию полупроводниковых материалов. Учеб. пособие для специальности „Полупроводники и диэлектрики“ вузов* (М., Высш. шк., 1970).
- [13] K. Saarinen, A.P. Seitsonen, P. Hautojarvi, C. Corbel. *Phys. Rev. B*, **52** (15), 10932 (2002).
- [14] В.П. Кладько, Т.Г. Крыштаб, Ю.С. Клейнфельд, Г.Н. Семёнова, Л.С. Хазан. ФТП, **26** (2), 368 (1992).

Редактор Т.А. Полянская

Influence of the low-energy Ar ion bombardment on the working and back sides of the GaAs singlecrystal substrate

A.S. Alalykin, P.N. Krylov, I.V. Fedotova, A.B. Fedotov*

The Udmurt State University,
426034 Izhevsk, Russia

* The Nizhniy Novgorod State Technical University,
603024 Nizhniy Novgorod, Russia

Abstract The characteristics of the working and back sides of the monocrystal gallium arsenide with were processed by argon's ions low energies were discovered by noncontact methods. The changes of optical and photoelectric properties of the irradiated and not irradiated sides are founded. The soliton mechanism of the defect penetration into wafers is suggested.