

ДИСЛОКАЦИИ В AlGaAs/GaAs-СВЕРХРЕШЕТКЕ

Трусова И. А., Поляков М. Е.

В гетероструктуре AlGaAs/GaAs с большим числом слоев сверхрешетки рассчитанные остаточные напряжения без учета дислокаций превышают предел текучести, что свидетельствует о введении дислокаций несоответствия при охлаждении совпадающих при температуре эпитаксии постоянных решеток слоев.

В приближениях одиночного слоя и многих слоев исследованы критические толщины наращенных слоев без учета взаимодействия дислокаций, с учетом взаимодействия диполей дислокации и мультипольным взаимодействием. Показано, что слои с критическими толщинами растут с учетом числа взаимодействия дислокаций. Этот результат объясняется ростом работы, затрачиваемой на взаимодействие дислокаций. Значительного различия в значениях критических толщин для случаев дипольного и мультипольного взаимодействий не обнаружено в противовес случаю отсутствия взаимодействия дислокаций.

Исследованы критические толщины для мультипольного и многослойного случая без учета равновесного скольжения. В этом случае отмечено пороговое число слоев, с превышением которого вводятся дислокации.

Экономичные и эффективные лазерные AlGaAs/GaAs-диоды с квантовыми ямами (КЯ) по сравнению с обычными лазерными диодами ненадежны [1]. Они подвержены быстрой деградации, связанной с образованием дислокационной сетки в активной области [1]. Причиной быстрой деградации таких лазеров, как показано в работе [2], является повышенная величина остаточных напряжений в активной области, возникающих при выращивании.

Были сообщения об улучшении качества наращенных гетерослоев с использованием буферной сверхрешетки [3], обусловленного якобы фильтрованием дислокаций сверхрешеткой. Впоследствии это мнение опровергалось [4] на том основании, что увеличение интенсивности фотолюминесценции слоев с использованием буферной сверхрешетки обусловлено не снижением плотности дислокаций исследуемого слоя, а уменьшением примеси. Возникает вопрос об изменении величин механических напряжений с ростом числа слоев сверхрешетки на основе структур AlGaAs/GaAs и о распределении дислокаций в них.

Для ответа на поставленный вопрос исследуются величины остаточных напряжений в двойной гетероструктуре AlGaAs/GaAs с 15-периодной сверхрешеткой с изменением температуры. Толщины квантово-размерных слоев (КРС) $t_i = 105 \text{ \AA}$ меньше длины L и ширины W слоев (см. рисунок), а пластическая деформация слоев, обусловленная введением дислокаций при выращивании, обычно не учитывается, так как считается, что для типичной концентрации AlAs в AlGaAs, достигающей порядка 0.35, дислокации несоответствия не образуются [5]. При температуре выращивания постоянные решетки слоев GaAs и AlGaAs совпадают [6], поэтому упругая деформация от несоответствия постоянных слоев решетки также не учитывается.

Из системы равенства сил F_i , моментов сил $F_i t_i'$ и разницы удлинений на границе слоев для 33-слойной структуры

$$\sum_{i=1}^{33} (-1)^i F_i = 0, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{33} (-1)^i F_i t_i' - \frac{GW}{12R} \sum_{i=1}^{33} t_i^3 = 0,$$

$$(-1)^{i-1} \frac{F_{i-1}}{t_{i-1}WG} + (-1)^{i-1} \frac{F_i}{t_iGW} - \frac{t_i + t_{i-1}}{2R} = (\alpha_i - \alpha_{i-1}) \Delta T,$$

$$i = 2 \div 33,$$

где G — модули упругости всех слоев, которые принимаются одинаковыми, t_{i-1} — суммарная толщина слоев до i -го слоя, $t_i' = \sum_{j=1}^i t_j + t_i/2$, α_i — коэффициент линейного температурного расширения i -го слоя, ΔT — разница между температурами выращивания и комнатной, R — радиус кривизны слоев, определяемый напряжением в каждом слое:

$$\sigma_i = \pm \frac{F_i}{t_i W} + \frac{yG}{2R}. \quad (2)$$

Координата $y=0$ размещается в середине каждого слоя, знак «+» соответствует растяжению, а «-» — сжатию. В рассматриваемой структуре чередуются два типа слоев с разными α .

Для типичных размеров гетероструктур $W=10^{-4}$ м, $t_1=9.7 \cdot 10^{-5}$ м, $t_2=0.8 \cdot 10^{-6}$ м, $t_3=t_4=\dots=t_{31}=1.05 \cdot 10^{-8}$ м, $t_{32}=1.1 \cdot 10^{-6}$ м, $t_{33}=1.0 \cdot 10^{-6}$ м и $G=100$ ГПа [7], $(\alpha_{33} - \alpha_{32}) \Delta T = 5 \cdot 10^{-4}$ (при окружающей температуре $T_0=293$ К), $6.1 \cdot 10^{-4}$ ($T_0=100$ К) и $4.7 \cdot 10^{-4}$ ($T_0=345$ К) [8]. При этом температура эпитаксии равна 1172 К, а концентрация AlAs в AlGaAs принимается равной 0.35.

В результате расчета показано, что для случая согласования постоянной решетки слоев при температуре эпитаксии, любых T_0 и условиях отсутствия дислокаций несоответствия получаются расчетные остаточные напряжения значительной величины, превосходящие предел текучести. Поскольку в действительности такие величины не реализуются, следует вывод о введении дислокаций несоответствия при охлаждении эпитаксиальных слоев GaAs/AlGaAs, согласованных по постоянной решетки при температуре эпитаксии. Значительная величина остаточных напряжений обусловлена накоплением деформаций, вызванных различием коэффициентов расширения слоев. Поскольку дислокации ухудшают оптические свойства гетероструктур, при выращивании GaAs/AlGaAs-гетероструктур со сверхрешеткой введение дислокаций несоответствия необходимо учитывать.

При температуре эпитаксии постоянная решетки слоев одна и та же, дислокации не вводятся, но при охлаждении, например до комнатной температуры 393 К, суммарное несоответствие от взаимодействия 33 слоев достигает $1.65 \cdot 10^{-2}$, что представляет значительную величину. С какого-то интервала температур, вероятно, начинают вводиться дислокации. На их количество влияет не только суммарное несоответствие, но и суммарная толщина слоя, поскольку критическое не-

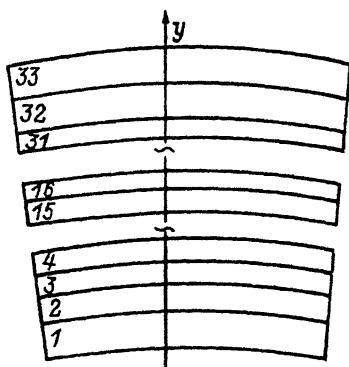


Схема расположения слоев гетероструктуры со сверхрешеткой. 1 — подложка GaAs, 2 — слой л-AlGaAs, 3, 5, ..., 29, 31 — квантово-размерные слои GaAs, 4, 6, ..., 28, 30 — квантово-размерные слои AlGaAs; 32 — буферный л-AlGaAs, 33 — контактный слой GaAs.

соответствие определяется не только рассогласованием, но и толщиной слоев.

Возникает вопрос о методике расчета, предельных характеристиках, превышение которых влечет за собой введение дислокаций, и о месте введения дислокаций. Вероятно, они вводятся на границах гетерослоев с плотностью, пропорциональной толщине наращенного слоя. Первоначально представляется расчет по общеизвестной методике [9]. В приближении одиночного наращенного слоя из условия минимизации суммы упругой энергии E_ϵ на единицу границы раздела слоев

$$E_\epsilon = 2G \frac{1 + \nu}{1 - \nu} t_0 \epsilon^2 \quad (3)$$

и энергии краевых дислокаций

$$E_d = (f - \epsilon) \frac{Gb}{4\pi(1 - \nu)} \left(\ln \frac{t_0}{b} + 1 \right) \quad (4)$$

по ϵ сначала определяется равновесное значение упругой деформации ϵ в пленке толщиной t_0 , а затем из условия отсутствия дислокаций $\epsilon = f - \text{критическая}$ толщина наращенного слоя $t_{\text{кр}}$:

$$t_{\text{кр}} = \frac{b}{8\pi f(1 + \nu)} \left(\ln \frac{t_{\text{кр}}}{b} + 1 \right), \quad (5)$$

где ν — коэффициент Пуассона, f — несоответствие слоев.

Величина $t_{\text{кр}}$ оценивается для значений $f = 1.504 \cdot 10^{-2}$ (суммарное несоответствие на границе раздела 33 слоев толщиной t_0 при охлаждении до 345 К). В этом случае $t_0 = 3.2045 \cdot 10^{-6}$ м, $b = 5.6$ Å, $\nu = 0.312$ [10], $t_{\text{кр}} = 3.04$ нм. При превышении такой незначительной толщины вводятся дислокации несоответствия. Значение суммарной упругой деформации в гетероструктуре в соответствии с [9] равно $\epsilon = 5.11 \cdot 10^{-5}$, $f = 1.504 \cdot 10^{-2}$. Часть несоответствия аккомодирует с образованием дислокаций несоответствия плотностью $N_d = (\bar{f}/b) = 7.17 \cdot 10^{10}$ см $^{-2}$, $\bar{f} = f - \epsilon = 1.5 \cdot 10^{-2}$.

Вопрос о распределении упругой деформации решается следующим образом. Поскольку упругая деформация пропорциональна толщине наращиваемого слоя, она на границе слоев пропорциональна толщине наращенного слоя. На границе слоев $l-2$ $\epsilon_{1-2} = 1.275 \cdot 10^{-5}$, $\epsilon_{2-3} = 1.674 \cdot 10^{-7}$, $\epsilon_{3-4} = \dots = \epsilon_{30-31} = 1.674 \cdot 10^{-7}$, $\epsilon_{31-32} = 1.754 \cdot 10^{-5}$, $\epsilon_{32-33} = 1.595 \cdot 10^{-5}$.

Плотность дислокаций распределяется также пропорционально толщинам слоев, поскольку связана с релаксацией упругих деформаций, которые в свою очередь пропорциональны толщине наращенного слоя. Плотность дислокаций на границе слоев $l-2$ $N_{d_{1-2}} = 1.79 \cdot 10^{10}$, $N_{d_{2-3}} = \dots = N_{d_{30-31}} = 2.35 \cdot 10^8$, $N_{d_{31-32}} = 2.46 \cdot 10^{10}$, $N_{d_{32-33}} = 2.23 \cdot 10^{10}$ см $^{-2}$. Знаки упругой деформации на границе слоев совпадают со знаком несоответствия на границе слоев для случая отсутствия релаксации деформаций.

В случае охлаждения до температуры $T_0 = 293$ К ($\Delta\alpha\Delta T = 5 \cdot 10^{-4}$, $f = 1.6 \times 10^{-2}$, $t_0 = 3.2045 \cdot 10^{-6}$ м, $b = 5.6$ Å, $\nu = 0.312$) $t_{\text{кр}} = 2.75$ нм. Величина ϵ не зависит от f , поэтому при всех T_0 не зависит и от T_0 . При охлаждении до разных температур величина упругой деформации не изменяется, а изменяется лишь число вводимых дислокаций. Чем ниже температура окружающей среды, тем больше должно вводиться дислокаций. Суммарная плотность вводимых дислокаций составляет $8.11 \cdot 10^{10}$ см $^{-2}$. Плотность дислокаций на границе раздела сред $l-2$ составляет $2.02 \cdot 10^{10}$, сред $2-3 - \dots$, $30-31$ не превышает $2.65 \cdot 10^8$, сред $31-32 - 2.78 \cdot 10^{10}$, сред $32-33 - 2.53 \cdot 10^{10}$ см $^{-2}$.

При охлаждении до температуры $T_0 = 100$ К ($\Delta\alpha\Delta T = 6.1 \cdot 10^{-4}$, $f = 1.952 \times 10^{-2}$, $t_0 = 3.2045 \cdot 10^{-6}$ м, $b = 5.6$ Å, $\nu = 0.312$) критическое значение нарощенного слоя составляет $t_{кр} = 1.95$ нм. Суммарная плотность дислокаций превышает $1.2 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$, а на границах следующих слоев равна: $1-2 - 3.01 \cdot 10^{10}$, $3-4 - \dots$, $30-31 - 3.95 \cdot 10^8$, $31-32 - 4.14 \cdot 10^{10}$, $32-33 - 3.77 \cdot 10^{10}$ см $^{-2}$.

Возникает вопрос о наличии дислокаций в AlGaAs/GaAs-гетеролазере с одиночной квантовой ямой. Пусть при прежней толщине подложки $t_2 = 0.8 \cdot 10^{-6}$, $t_3 = 1.05 \cdot 10^{-8}$, $t_4 = 1.1 \cdot 10^{-6}$, $t_5 = 1.0 \cdot 10^{-6}$ м. Суммарная толщина нарощенных слоев достигает $2.9105 \cdot 10^{-6}$ м, $f = 2 \cdot 10^{-3}$ ($T_0 = 293$ К, $\Delta\alpha\Delta T = 5 \cdot 10^{-4}$). Рассчитанное в соответствии с [9] $\epsilon = 5.57 \cdot 10^{-5}$. Дислокации должны вводиться, поскольку $f > \epsilon$.

В предложенном методе расчета критических толщин наращиваемых слоев учитывались лишь энергия упругой деформации от несоответствия постоянных решетки слоев и энергия дислокаций. В реальном процессе дефектообразования происходят взаимодействие дислокаций, перемещение дислокаций, преодоление всевозможных помех (точечных-дефектов, изменение барьеров с изменением температуры, пересечение дислокаций). Для зарождения дислокаций наиболее важным является наличие дефектного участка.

Отдельные моменты дислокационного дефектообразования учитывались в работе [11]. Получены формулы для расчета критической толщины нарощенного слоя с учетом взаимодействия дислокаций в одно- и многослойных структурах.

В однослойном приближении тонких нарощенных слоев и для одиночного диполя значение критической толщины нарощенного слоя определяется из условия равенства нулю работы, затраченной на образование диполя, и имеет вид

$$t_{кр} = \frac{b}{4\pi f} \ln \left(\frac{\sqrt{2} t_{кр}}{b} \right). \quad (5a)$$

Критическая толщина для значения $f = 1.504 \cdot 10^{-2}$ (суммарное несоответствие на границе раздела 33 слоев при охлаждении до 345 К, $t_0 = 3.1045 \cdot 10^{-6}$, $b = 5.6$ Å) равна 9.37 нм. Итак, с учетом взаимодействия дислокаций диполя критическая толщина слоя (однослойное приближение структуры) составляет 9.37, а без учета взаимодействия дислокаций диполя — 3.04 нм. С учетом взаимодействия дислокаций критические толщины растут.

В приближении одного нарощенного слоя и многих диполей критическая толщина нарощенного слоя представляется в виде

$$\ln \left(\frac{\frac{2\pi t_{кр} f}{b} \sinh \frac{2\pi t_{кр} f}{b}}{\cos h \left(\frac{2\pi f}{b} \right) - 1} \right) / \frac{8\pi f}{b} = t_{кр}. \quad (6)$$

Для $f = 1.504 \cdot 10^{-2}$ (суммарное несоответствие на границах раздела 33 слоев при охлаждении до 345 К, $b = 5.6$ Å) критическая толщина наращиваемого слоя равна 10.35 нм. Эта величина получена для одиночного наращиваемого слоя с учетом взаимодействия между диполями дислокаций. Для случая одиночного наращиваемого слоя, но с учетом лишь взаимодействия между дислокациями диполя критическая толщина равна 9.37, а без учета взаимодействия между дислокациями диполя — 3.04 нм. Как и следовало ожидать, значения критических толщин наращиваемого слоя с учетом большего числа взаимодействия дислокаций растут.

В работе [11] проведен анализ различия результатов критических толщин, определенных как с учетом взаимодействия дислокаций, так и без учета. Показано, что при малых $t_{кр}/\lambda$ результаты совпадают (однослойное наращивание), поскольку при малых $t_{кр}/\lambda$ дипольное взаимодействие незначительно, а при

больших $t_{кр}/\lambda$ дипольное взаимодействие играет важную роль. В нашем случае $t_{кр}/\lambda$ большое ($t_{кр} = 9.37 \cdot 10^{-9}$ м, $\lambda = b/\varepsilon = 5.6 \cdot 10^{-10}$ м / $1.504 \cdot 10^{-2} = 3.7234 \times 10^{-8}$, $t_{кр}/\lambda = 0.2516$). Для мультипольного взаимодействия (однослойное наращивание) девиация от равновесного состояния становится заметной при $t_{кр}/\lambda \approx 0.1$. В нашем случае $t_{кр}/\lambda = 0.252$. Различие значений критических толщин для мультипольного дислокационного случая и для одиночного диполя понятно количественно [11]. Для больших $t_{кр}/\lambda$ (наш случай) взаимодействия дислокаций имеют тенденцию к росту работы на разделение взаимодействующих дислокаций в поперечном к границе раздела слоев направлении из-за того, что дислокации противоположного знака притягиваются.

Для многослойного и мультипольного случаев, но без учета равновесного скольжения дислокаций критическая толщина слоев определяется, как и прежде, из условия минимизации общей энергии по формуле

$$\ln \sinh \left(\frac{m\pi t_m f_0}{b} \right) + \frac{m\pi t_m f_0}{b} \coth \left(\frac{m\pi t_m f_0}{b} \right) = 0, \quad (7)$$

где m — номер слоя относительно подложки, f_0 — несоответствие на границе двух слоев.

При $\varepsilon_0 = 4.7 \cdot 10^{-4}$ (несоответствие постоянных решетки GaAs и AlGaAs при охлаждении до 345 К), $b = 5.6 \cdot 10^{-10}$ м из уравнения (7) находятся критические значения толщин слоя t_m для каждого наращенного слоя. Из (7) следует, что $mt_m = 0.3465729$, а $t_2 = 0.065721$, $t_3 = 0.043814$, $t_4 = 0.032861$ мкм, ..., $t_{12} = 109.5$, $t_{13} = 101.1$, $t_{14} = 93.8$, $t_{15} = 87.6$, $t_{21} = 62.5$, $t_{32} = 41.0$ Å.

Из сравнения значений наращенных и критических толщин следует, что дислокации вводятся в буферные AlGaAs-слои, в контактный GaAs-слой и с 13 по 31 квантово-размерные слои. С 3 по 12 КРС дислокации несоответствия не вводятся. Следовательно, в лазерных диодах с 5-периодной сверхрешеткой дислокации несоответствия не должны вводиться в сверхрешетку.

В данной работе предполагается, что дислокации вводятся в процессе охлаждения гетероструктуры. Экспериментальное введение дислокаций при охлаждении гетероструктур обнаружено при выращивании GaP и GaAs на кремнии [12]. Так, при охлаждении GaP/Si вводятся дислокации несоответствия с плотностью 10^6 см⁻². Проводились in situ измерения дислокаций по ямкам травления гетероструктуры GaAs/Si при температуре роста (получено значение $4 \cdot 10^4$ см⁻²). Однако при охлаждении до комнатной температуры плотность дислокаций увеличилась до $\sim 6 \cdot 10^6$ см⁻².

Результаты экспериментального исследования дислокаций, вводимых в напряженные многослойные гетероструктуры, указывают на устойчивость против введения дислокаций, даже если толщины слоев превышают термодинамические критические толщины для стабильных дислокаций несоответствия [13] в отсутствие дефектов или больших внешних напряжений. При наращивании гетерослоев с наличием несоответствия на границе слоев постоянная решетки наращенного слоя искажается тетрагонально, причем основное искажение происходит в направлении роста и лишь незначительное — в плоскости роста как для InP/InGaSaP [14], так и для GaAs/AlGaAs-гетероструктур [15, 16]. Дислокация несоответствия в InP/InGaAsP-гетероструктуре вводятся, если несоответствие превышает $5 \cdot 10^{-3}$ [14]. Экспериментальная критическая толщина наращенного InGaAsP-слоя на InP-подложку превышает определенную теоретически из формулы

$$t_{кр} = \frac{b(1 - \nu \cos^2 \alpha)}{8\pi f(1 + \nu) \cos \beta} \left(\ln \frac{t_{кр}}{b} + 1 \right) \quad (8)$$

в 7 раз [14]. Для этого образца взяты параметры $b = 4.14 \text{ \AA}$, $\lambda = 0.35$, $\Delta a^+ / a = 0.005$, $\cos \alpha = \cos \beta = 0.5$, $f = 0.0024$, $t_{\text{кр}} = 550 \text{ \AA}$ [14].

Отсутствие дислокаций в AlAs/GaAs-гетероструктурах с несоответствием постоянных решетки $1.26 \cdot 10^{-3}$ при комнатной температуре ранее объяснялось отсутствием дислокаций несоответствия из-за совпадения постоянных решетки при температуре эпитаксии $800\text{--}900 \text{ }^\circ\text{C}$ [17]. Отсутствие вводимых дислокаций при охлаждении гетероструктуры объясняется быстрой охладкой, малой вероятностью процессов скольжения при $T < 500 \text{ }^\circ\text{C}$ и переползания за короткое время, хотя отмечалось, что развивающиеся напряжения превышают критическую величину напряжения сдвига ($\epsilon = 5 \cdot 10^{-4}$ при $500 \text{ }^\circ\text{C}$). В нашем случае развивающиеся напряжения превышают напряжения в цитируемой работе на порядки, что значительно повышает вероятность скольжения и переползания дислокаций.

В работе [18] исследована шероховатость гетерограниц $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ -сверхрешеток на GaAs-подложке в электронном микроскопе с большим различием $\Delta x = y - x$. Анализ изображений четырех границ квантово-размерных слоев AlAs (25 Å)/ $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (100 Å) при ширине поля изображения до сорока постоянных решетки не выявил дислокаций несоответствия. Как и следовало ожидать, в работе подтверждено наличие растяжения решетки AlAs в направлении роста (001) при квадратной форме решетки GaAs. На десяти границах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (1 нм)/GaAs (1 нм) ($x = 0.2 \div 0.4$) сверхрешетки на подложке GaAs [19] дислокаций несоответствия не просматривается. Из результатов работы [20] не обнаруживается дислокаций несоответствия и в системе InAs/GaAs с 7% несоответствия постоянных решетки слоев.

Наличие эффекта фильтрации дислокаций сверхрешеткой доказывалось увеличением интенсивности фотолюминесценции нарощенного на сверхрешетку слоя [3]. Впоследствии этот довод опровергался и указывалась новая причина усиления фотолюминесценции, связанная с уменьшением примеси [4]. Объяснение фильтрации дислокаций сводится к сдвигу ростовых дислокаций от направления роста, вызванного деформацией несоответствия [3]. Поскольку смежные слои сверхрешетки имеют противоположную деформацию, она вынуждает отклоняться ростовую дислокацию в ту или иную сторону. Для достижения чистого отклонения от направления роста различие вынуждающих сил может быть обусловлено различием упругих свойств слоев. Так, указывается, что дислокации могут легко проходить через более податливый слой и испытывают большее отклонение в более жесткой среде. Этот механизм приписывался объяснению успешного роста почти свободных от дислокаций напряженных слоев сверхрешетки [19]. Такие сверхрешетки имели толщины меньше, чем критические толщины для упругой аккомодации несоответствия между слоями. Дополнительно привлекалось энергетическое предпочтение расположения дислокаций в более податливой среде, и поэтому фильтрация дислокаций ожидалось даже при согласованных слоях сверхрешетки, но с различными модулями упругости слоев [3]. Схема исследования фильтрации дислокаций сверхрешеткой позволяла контролировать плотность дислокаций как в буферном слое, так и в сверхрешетке с помощью разных длин волн возбуждения слоев. Окончательный вывод работы [3] состоит в неполном исключении дислокаций с помощью сверхрешетки. Во всех образцах обнаруживались области (в сверхрешетке), в которых присутствовали дислокации. В работе [19] методом просвечивающей микроскопии специально исследовались сверхрешетки и квантовые ямы, выращенные на подложке GaAs, с целью выявления дислокаций роста или несоответствия. Использовались образцы с тремя разными геометриями: а) сверхрешетки, состоящие из 12 слоев $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (18 нм толщиной) и 12 слоев GaAs (20 нм толщиной), выращенные молекулярно-пучковой эпитаксией; б) структура с квантовыми ямами, состоящая из пяти квантовых ям (4 нм толщиной) между (50÷70 нм толщиной) слоями $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, выращенными газофазной эпитаксией из металлоорганических соединений; в) структура из трех слоев AlAs (5, 10 и 20 нм

толщиной) и трех слоев $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ (5, 10 и 15 нм толщиной), разделенных (100 нм толщиной) слоями GaAs и выращенных молекулярно-пучковой эпитаксией.

С помощью электронной микроскопии как дислокации роста, так и дислокации несоответствия не обнаружены [21]. Затем искусственно генерировались дислокации деформацией после скрайбирования (001) поверхности [30 МПа, 4 мин при 320 °С, скольжение 60-градусных дислокаций в (111) и ($\bar{1}\bar{1}$) плоскостях]. Исследование распространения вводимых 60-градусных дислокаций показало, что ~50% всех дислокаций не взаимодействует с гетерограницей. Однако иные дислокации, которые пересекали два AlGaAs-слоя без взаимодействия, изгибались на гетерогранице и располагались параллельно гетерогранице с последующим проникновением в соседний слой. По существу граница выполняла роль параллельного смещения дислокации. Такой вид взаимодействия дислокации и гетерограницы присущ лишь образцам геометрии (в). Вот характерный пример описания прохождения дислокаций гетерограницы. Дислокация пересекает слой AlAs (10 нм толщиной) в точке А. Между точками А и В дислокация встречает (20 нм толщиной) слой AlAs и начинает отклоняться от винтовой ориентации. В точке В она изгибается и располагается вдоль гетерограницы GaAs/AlAs. Между точками В и D дислокация остается в GaAs и ее состояние не изменяется. В точке D дислокация пересекает слой AlAs и между точками D и E она располагается вдоль другой стороны квантовой ямы. После двухмикронного параллельного гетерогранице расположения дислокация начинает изгибаться и снова приобретает винтовой характер.

Для подтверждения того, что дислокация лежит в ($\bar{1}\bar{1}$) плоскости скольжения, проводились эксперименты при наклонной [110] оси. Если бы был значительный процесс переползания, то он бы легко обнаруживался, в частности, при наклоне. При отклонении 25° от [111] оси к направлению [001] часть дислокаций, расположенных вдоль границы, была параллельной [110] направлению в пределах 1°. Из этого было заключено, что иногда в очень малой степени процесс переползания имеет место. Вдоль гетерограницы дислокация прямолинейная. В точке D — месте перехода квантовой ямы — дислокация частичная и имеет волнистый характер, а ширина расщепления изменяется. Стягивание, которое связывается с наличием ступени, может иметь место в этой точке. Исследования образцов геометрии (а) ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ -сверхрешетки) и геометрии (б) (GaAs-КЯ в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) не обнаружили систематического расположения дислокаций вдоль гетерограницы. Большинство дислокаций пересекало гетероструктуру без каких-либо очевидных взаимодействий. Однако часто наблюдались точки закрепления дислокаций.

Следовательно, фильтрования дислокаций в умеренно деформированных (30 МПа) гетероструктурах GaAs/AlGaAs со сверхрешеткой не обнаружено; возможно лишь параллельное смещение дислокаций в определенных случаях, при которых релаксируют напряжения несоответствия. Для релаксации напряжения несоответствия необходимо наличие краевого компонента, расположенного вдоль гетерограницы, что и наблюдается. Подтверждение этого вывода доказывает экспериментальным способом наблюдением смещения дислокаций в гетероструктурах с толстыми слоями, как видно из результатов работы [21]. В напряженных GaAs/ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -слоях сверхрешетки с большей деформацией на границе слоев (0.7%) по сравнению с AlGaAs/GaAs (0.17%) все оптически вводимые дислокации располагались вдоль гетерограницы и не пересекали сверхрешетку [21].

В работе [22] при выращивании GaAs/Si методом специального наклона подложки создавались условия введения на границе слоев с вектором Бюргерса, параллельным гетерогранице краевых дислокаций, не проникающих в объем эпитаксиального слоя. Такой метод привел к структуре эпитаксиального слоя с низкой плотностью дислокаций.

Из полученных результатов данной работы можно сделать следующие выводы. В рамках теории Хирта—Хиаохих в приближении одиночного слоя исследованы критические толшины когерентно наращенных GaAs/AlGaAs-сверхрешеток на GaAs-подложку для одиночного диполя, мультиполей и для равновесного случая. Критические толшины растут с учетом количества связей взаимодействия дислокаций. Этот результат объясняется ростом работы, затрачиваемой на взаимодействие дислокаций. Значительного различия в значениях критических толщин для случаев одиночного диполя и мультиполей не наблюдается, но в сравнении с равновесным случаем — различие в несколько раз.

Исследованы критические толшины для мультипольного и многослойного случаев без учета равновесного скольжения. При этом отмечено пороговое число квантово-размерных слоев, с превышением которого вводятся дислокации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Madhava-Menon E. C., Petroff P. M. // *Appl. Phys. Lett.* 1989. V. 54. N 26. P. 2683—2685.
- [2] Поляков М. Е. // *Квант. электрон.* 1989. Т. 16. В. 1. С. 43—48.
- [3] Gourly R. L., Drummond T. J., Joyle B. L. // *Appl. Phys. Lett.* 1986. V. 49. N 17. P. 1101—1113.
- [4] Lakner H., Bollig B., Kubalea E. et al. // *J. Cryst. Growth.* 1991. V. 107. N 1. P. 452—457.
- [5] Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. // *Кристаллография.* 1977. Т. 22. В. 2. С. 431—447.
- [6] Ettenberg M., Paff R. S. // *J. Appl. Phys.* 1970. V. 41. N 10. P. 4926—4927.
- [7] Olsen G., Ettenberg M. // *J. Appl. Phys.* 1977. V. 48. N 6. P. 2543—2547.
- [8] Reinhart F. K., Logan R. A. // *J. Appl. Phys.* 1973. V. 44. N 7. P. 3171—3175.
- [9] Тхорик Ю. А., Хазан Л. С. *Пластическая деформация и дислокации несоответствия в гетероэпитаксиальных системах.* Киев, 1983. 304 с.
- [10] Adachi S. // *J. Appl. Phys.* 1982. V. 53. N 12. P. 8775—8792.
- [11] Hirth J. P., Xiaoxih F. // *J. Appl. Phys.* 1990. V. 67. N 7. P. 3343—3349.
- [12] Tachekawa M., Mori H. // *Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 56. N 22. P. 2225—2227.
- [13] Kamat S. V., Hirth J. P. // *J. Appl. Phys.* 1990. V. 67. N 11. P. 6844—6850.
- [14] Oe K., Shinoda Yu., Sugiyama K. // *Appl. Phys. Lett.* 1978. V. 33. N 11. P. 962—964.
- [15] Kishino S., Ogirima M., Kajimuro T. et al. // *J. Cryst. Growth.* 1974. V. 24-25. P. 266—267.
- [16] Ishida K., Matsui J. et al. // *Phys. St. Sol. (a).* 1975. V. 31. N 1. P. 255—262.
- [17] Олсен Г. Х., Эттенберг М. // *Рост кристаллов.* М., 1981. № 2. С. 9—76.
- [18] Suzuki Yo., Okamoto H. // *J. Appl. Phys.* 1985. V. 58. N 9. P. 3456—3462.
- [19] Osamyra K., Matsushima W., Hiyamizu S., Muto Sh. // *Japan. J. Appl. Phys.* 1987. V. 26. N 3. P. 352—356.
- [20] Danterriches S., Marzin J. Y., Roux C. L., Goldstein L. // *J. Cryst. Growth.* 1987. V. 81. N 1. P. 121—129.
- [21] Kuesters K.-H., De-Coman B. C., Carter C. B. // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 58. N 11. P. 4065—4073.
- [22] Fisher R., Neuman D., Zabel H., Markoc H. // *Appl. Phys. Lett.* 1986. V. 48. N 18. P. 1223—1225.

Белорусский политехнический институт
Минск

Получена 9.09.1991
Принята к печати 26.11.1991