

06.2; 06.3; 07; 12

© 1991

НАПРЯЖЕННЫЕ СЛОИ И СВЕРХРЕШЕТКИ  $CaF_2$ - $SrF_2$   
НА КРЕМНИИ И АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯХ.К. А л ь в а р е с, С.В. Н о в и к о в,  
Н.С. С о к о л о в, Н.Л. Я к о в л е в

Как известно [1], эпитаксиальные слои фторидов кальция и стронция, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на полупроводниках, представляют значительный интерес как для разнообразных применений в микроэлектронике, так и для проведения фундаментальных физических исследований. Для получения согласованных по постоянной решетки структур  $GaAs$ -фторид в [2] использовались твердые растворы  $(Ca, Sr)F_2$ . В ряде случаев, однако, более предпочтительным, на наш взгляд, было бы применение напряженных слоев и сверхрешеток на основе чистых фторидов  $CaF_2$  и  $SrF_2$ . Однако принципиальная возможность получения таких напряженных структур до настоящего времени оставалась неясной. Тем более, что в [3] на основе анализа картин дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭ) приводятся свидетельства в пользу непсевдоморфного (некогерентного) характера роста фторидов на полупроводниках и фторидов на фторидах. В [4] было убедительно показано, что при определенных условиях возможен псевдоморфный рост  $CaF_2$  на  $Si(111)$ .

В настоящей работе *in situ* анализировались осцилляции интенсивности ДБЭ в процессе эпитаксиального роста  $CaF_2$  и  $SrF_2$ , а также спектры низкотемпературной фотолюминесценции ионов  $Sm^{2+}$  с целью изучения возможности когерентного роста слоев фторидов в такой сильно рассогласованной (~6,2%) гетеропаре.

Выращивание эпитаксиальных слоев  $CaF_2$  и  $SrF_2$  на  $Si$  и  $GaAs$  производилось методом молекулярно-лучевой эпитаксии в небольших исследовательских установках, описанных в основных чертах в [5]. Для измерения интенсивности рефлексов ДБЭ во время роста фторидов использовались электронно-оптический усилитель яркости и фотоумножитель. Возбуждение фотолюминесценции (ФЛ) производилось с помощью He-Ne лазера, а ее анализ производился с помощью двойного монохроматора и охлаждаемого фотоумножителя, работающего в режиме счета фотонов.

Методика очистки поверхности подложек кремния и технология выращивания слоев фторидов описаны в [5]. Перед ростом фторидов на поверхности  $GaAs(111)$  выращивался тонкий (10 нм) буферный слой арсенида галлия при температуре подложки  $T_s=590^\circ C$ . После охлаждения подложки до  $500^\circ C$  под потоком  $As_4$  обычно наблюдалась сверхструктура  $2 \times 2$ . Далее шторка источника  $As_4$

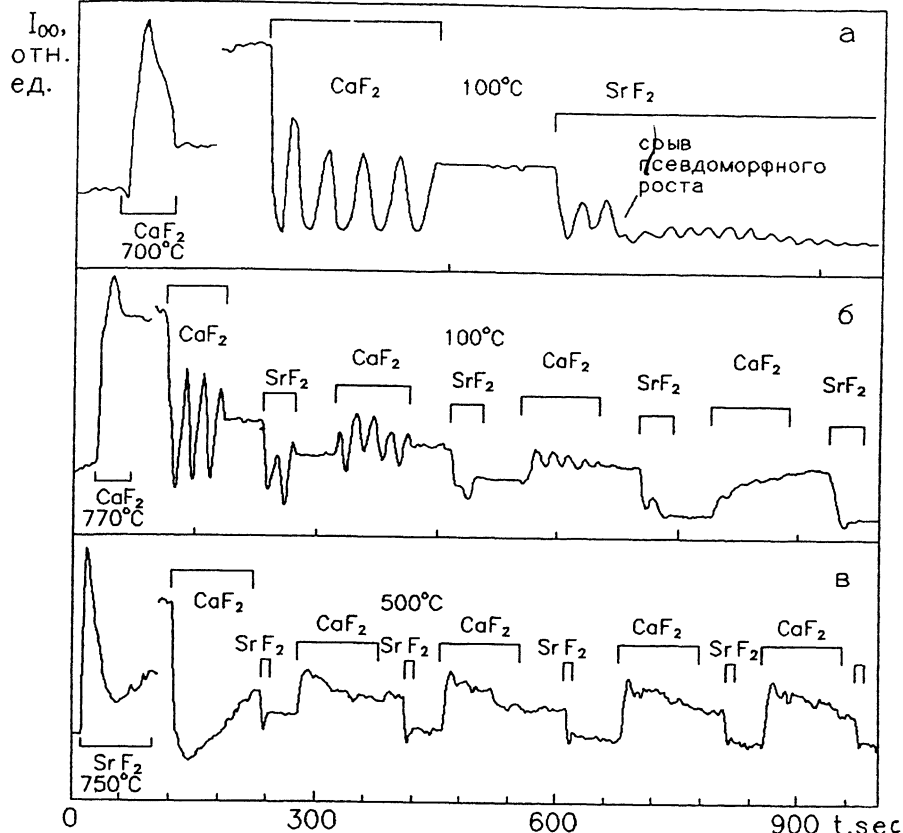


Рис. 1. Зависимости интенсивности рефлекса 00 в картинах ДБЭ от времени при выращивании структуры  $SrF_2/CaF_2/Si(111)$  (а), сверхрешетки  $[2(SrF_2)/4(CaF_2)]_4/CaF_2/Si(111)$  (б), сверхрешетки  $[1(SrF_2)/10(CaF_2)]_{10}/SrF_2/Si(111)$  (в). Азимут электронного луча  $[11\bar{2}]$ , угол падения  $\sim 40$  мин, энергия электронов 15 кэВ.

закрывалась и начинался рост фторида. Контроль толщины выращенных слоев фторида производился по осцилляциям интенсивности ДБЭ [4], один период которых соответствовал росту одного монослоя фторида.

На рис. 1 представлены зависимости от времени интенсивности дифракционного рефлекса 00 при выращивании напряженных слоев (а) и сверхрешеток (б, в) фторидов на  $Si(111)$ . Анализ зависимости  $I_{00}(t)$ , приведенной в верхней части этого рисунка, показывает, что рост первых двух монослоев  $SrF_2$  на поверхности  $CaF_2$  происходит когерентно, а при заполнении третьего монослоя наблюдается срыв псевдоморфизма. Такая малая величина критической толщины для псевдоморфного роста слоя не является неожидан-

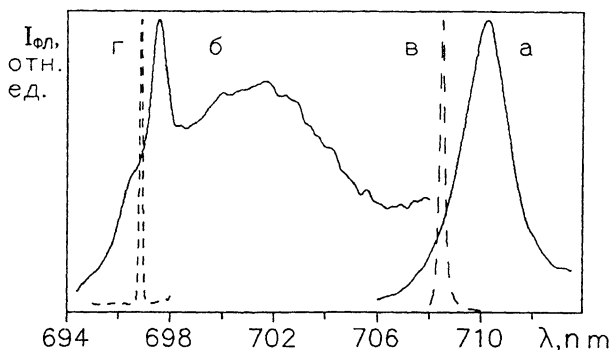


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции ионов  $Sm^{2+}$  при 1.8 К в сверхрешетках  $[1(SrF_2)/10(CaF_2:Sm)]_{10}/CaF_2/Si(111)$  (а),  $[1(SrF_2)/10(CaF_2:Sm)]_{10}/SrF_2/Si(111)$  (б) и объемных монокристаллах  $CaF_2:Sm$  (в) и  $SrF_2:Sm$  (г).

ной, если учесть большую величину несоответствия постоянных решеток  $SrF_2$  и  $CaF_2$ . Измерив критическую толщину псевдоморфного роста  $SrF_2$  на  $CaF_2$ , мы смогли вырастить напряженную сверхрешетку  $2(SrF_2)/4(CaF_2)$ , имеющую 4 периода (рис. 1, б). Наблюдаемое затухание осцилляций связано, по-видимому, с развитием рельефа поверхности из-за низкой температуры роста слоя ( $100^\circ C$ ). Зависимость  $I_{00}$  во время роста сверхрешетки  $1(SrF_2)/10(CaF_2)$  при температуре  $500^\circ C$  показана на рис. 1, в. Несмотря на зашумленность этой кривой можно видеть, что поведение  $I_{00}(t)$  при открывании источников повторяется в каждом периоде сверхрешетки, что свидетельствует о воспроизводимости условий роста слоя после начала каждого нового периода.

Спектры фотолюминесценции ионов  $Sm^{2+}$  в сверхрешетках  $[1(SrF_2)/10(CaF_2:Sm)]_{10}$ , выращенных при  $T_S = 500^\circ C$  на гетероструктурах  $CaF_2/Si(111)$  и  $SrF_2/Si(111)$ , показаны соответственно на кривых (а) и (б) рис. 2. На этом же рисунке представлены спектры фотолюминесценции ионов  $Sm^{2+}$  в области бесфононных линий переходов  $5d-4f$  в монокристалле  $CaF_2$  (кривая (в)) и перехода  $^5D_0 - ^7F_1$  внутри  $4f^6$  оболочки в монокристалле  $SrF_2$  (кривая (г)). Положение линии ФЛ в сверхрешетке, выращенной на  $CaF_2/Si(111)$ , показывает, что в ней слои  $CaF_2:Sm$  сжаты в плоскости интерфейса, а величина деформации близка к величине сжатия ( $-0.3\%$ ), наблюдаемой в псевдоморфных слоях  $CaF_2:Sm^{2+}$  на  $Si(111)$  [4]. Это позволяет сделать вывод о том, что данная сверхрешетка является напряженной и когерентной с подложкой кремния. Спектр ФЛ такой же сверхрешетки  $[1(SrF_2)/10(CaF_2:Sm)]_{10}$ , выращенной на  $SrF_2/Si(111)$ , имеет совершенно другой характер.

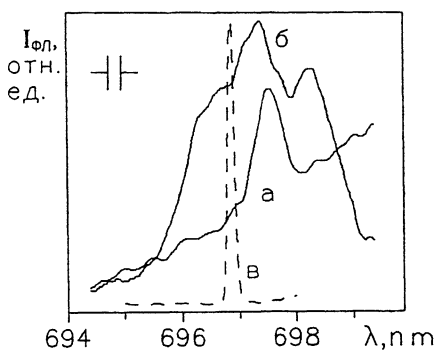


Рис. 3. Спектры люминесценции ионов  $Sm^{2+}$  при 1.8 К в сверхрешетке  $[2(SrF_2)/2(CaF_2:Sm)]_4/GaAs(111)$  (а), твердом растворе  $Ca_{0.5}Sr_{0.5}F_2:Sm/GaAs(111)$  (б) и объемном монокристалле  $SrF_2:Sm$  (в).

Во-первых, положение и полуширина линии люминесценции  $Sm^{2+}$  в слоях  $CaF_2$  свидетельствует о наличии в них значительной концентрации дефектов и существенной ( $\sim 1\%$ ) средней деформации растяжения. Наблюдаемая в этой сверхрешетке значительно большая ширина линии люминесценции по сравнению с кривой (а) указывает, по-видимому, на наличие некоторой релаксации упругих напряжений между слоями сверхрешетки. Во-вторых, вблизи 697.5 нм наблюдается новая узкая линия люминесценции. Близость ее к спектральному положению бесфонной линии запрещенного  $^5D_0-^7F_1$  перехода в  $4f^6$  оболочке ионов  $Sm^{2+}$  в объемных монокристаллах  $SrF_2$ , а также наблюдаемое насыщение ее интенсивности при увеличении интенсивности возбуждения позволяют предположить, что эти линии имеют сходную природу.

Одной из причин возникновения линии 697.5 нм может быть излучательная рекомбинация в ионах  $Sm^{2+}$ , расположенных вблизи гетерограниц  $SrF_2/CaF_2$ . В то же время известно [6], что энергия уровня смешанной конфигурации  $4f^55d$ , сильно возрастает при растяжении  $CaF_2$ . Проведенные нами оценки показали, что нельзя исключить возможность того, что в наиболее деформированных областях внутри слоев  $CaF_2$  могут реализоваться условия, в которых этот уровень оказывается выше уровня  $^5D_0$ , принадлежащего к  $4f^6$  оболочке, положение которого слабо меняется от величины деформации. Окончательное выяснение причины появления этой новой линии требует дополнительных исследований.

На рис. 3 приведены спектры ФЛ сверхрешетки  $[2(SrF_2)/2(CaF_2:Sm)]_4/GaAs(111)$  (а), твердого раствора  $Ca_{0.5}Sr_{0.5}F_2:Sm/GaAs(111)$  (б) и объемного монокристалла  $SrF_2:Sm^{2+}$  (в). Значительно меньшая ширина линии в области 697.5 нм на кривой (а) указывает на существенно большую упорядоченность расположе-

ния атомов  $\text{Ca}$  и  $\text{Sr}$  относительно ионов  $\text{Sm}^{2+}$  в сверхрешетке по сравнению с твердым раствором. Наклонный фон на кривой (а) обусловлен, по-видимому, главным образом, излучением ионов  $\text{Sm}^{2+}$  в слое  $\text{CaF}_2 : \text{Sm}$ , выращенном поверх этой сверхрешетки.

Таким образом, нами впервые были проанализированы зависимости интенсивности дифракции быстрых электронов на отражение во время эпитаксиального роста  $\text{CaF}_2$  и  $\text{SrF}_2$ , а также спектры низкотемпературной фотолюминесценции в напряженных слоях и сверхрешетках на основе этих фторидов. Результаты этого анализа показывают, что путем выбора условий роста методом молекулярно-лучевой эпитаксии, несмотря на большое рассогласование постоянных решеток этих фторидов, удается выращивать как полностью так и частично когерентные напряженные структуры и сверхрешетки фторидов на  $\text{Si}(111)$  и  $\text{GaAs}(111)$  В. Такие структуры представляют значительный интерес как для ряда практических применений, так и для проведения фундаментальных исследований в области физики низкоразмерных систем.

Авторы выражают признательность В.В. Овсянкину за обсуждение результатов, Е.Ф. Мартыненко за помощь в подготовке образцов и А.А. Каплянскому за поддержку работы.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] S c h o w a l t e r L.J., F a t h a u e r R.W. // J. Vac. Sci. Technol. 1986. V. A4. N 3. P. 1026-1032; I s h i w a r a H., A s a n o T., T s u t s u i K., L e e H.C., F u r u k a w a S. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1988. V. 102. P. 343-353.
- [2] W a h o T., S a e k i H. // Jap. J. Appl. Phys. V. 30. N 2. P. 221-227. F o n t a i n e C., M u n o z - Y a g u e A., H e r a l H., B e r n a r d L., R o c h e r A. // J. Appl. Phys. 1987. V. 61. N 8. P. 2807-2812.
- [3] F o n t a i n e C., C a s t a g n e J., B e d e l E., M u n o z - Y a g u e A. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 4. P. 2076-2078.
- [4] S o k o l o v N.S., Y a k o v l e v N.L., A l m e i d a J. // Solid State Commun. 1990. V. 76. N 7. P. 883-885.
- [5] Г а с т е в С.В., Н о в и к о в С.В., С о к о л о в Н.С., Я к о в л е в Н.Л. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 16. С. 961-966.
- [6] К а п л я н с к и й А.А., П р ж е в у с к и й А.К. // Опт. и спектр. 1965. Т. 19. № 4. С. 597-610.

Поступило в Редакцию

21 октября 1991 г.