

УДК 538.958

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РОСТА ГЕТЕРОСТРУКТУР CaF₂/(Si + CaF₂)/CaF₂/Si(111) НА СПЕКТР ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

© 2021 г. А. А. Величко^а, А. Ю. Крупин^{а, *}, Н. И. Филимонова^{а, **}, В. А. Илюшин^а

^аНовосибирский государственный технический университет, Новосибирск, 630073 Россия

*e-mail: mirazh@eml.ru

**e-mail: ninafilimonova@ngs.ru

Поступила в редакцию 27.07.2020 г.

После доработки 14.10.2020 г.

Принята к публикации 17.10.2020 г.

Работа посвящена исследованию влияния условий формирования структур CaF₂/(Si + CaF₂)/CaF₂/Si(111) на их излучательную способность в видимой области спектра. Многослойные гетероструктуры CaF₂/(Si + CaF₂)/CaF₂/Si(111) выращивали на подложках Si(111) методом молекулярно-лучевой эпитаксии в замкнутом технологическом цикле. Фотолюминесценцию возбуждали He–Cd лазером с длиной волны излучения 325 нм. Спектры измеряли при комнатной температуре. Подобранные параметры технологического процесса для получения структур, способных излучать в видимом диапазоне спектра. Экспериментально установлено, что люминесценция в структурах CaF₂/(Si + CaF₂)/CaF₂/Si(111) наблюдается только при соотношении потоков Si и CaF₂ 3.6–4.0. Экспериментально показано, что уменьшение скоростей роста слоев Si и CaF₂ в 1.5 раза, как и уменьшение толщины разделительных слоев CaF₂ до 1 нм, не влияет на положение максимумов в спектрах фотолюминесценции. Изменение режима отжига структур CaF₂/(Si + CaF₂)/CaF₂/Si(111) приводит к изменению положения максимума в спектрах фотолюминесценции. Оценка размеров нанокристаллов кремния, соответствующих наблюдаемому при фотолюминесценции значениям энергии, хорошо коррелирует с экспериментальными данными высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии и фотолюминесценции.

Ключевые слова: фотолюминесценция, молекулярно-лучевая эпитаксия, фторид кальция, гетероструктуры, нанокристаллы кремния.

DOI: 10.31857/S102809602103016X

ВВЕДЕНИЕ

Быстродействие современных интегральных схем высокой степени интеграции ограничено задержками в линиях связи. Решение этой проблемы, возможно, заключается в использовании оптических технологий, что требует создания интегральных оптоэлектронных компонентов и устройств, совместимых с технологией кремниевых интегральных схем. Такой подход наталкивается на существенные трудности, связанные с тем, что кремний является не прямозонным полупроводником и характеризуется неприемлемо низкой для изготовления светоизлучающих элементов эффективностью излучения. Поэтому обнаружение фотолюминесценции в пористом кремнии [1–3] стимулировало ее интенсивное исследование и активный поиск других способов повышения излучательной способности кремния.

В последнее время на основе кремния были получены структуры, способные люминесцировать как в инфракрасной, так и видимой области

спектра. Для увеличения квантового выхода люминесценции использовали различные способы, такие как введение в кремний специальных примесей с высокой эффективностью внутрицентровых переходов, например, Er³⁺ [4, 5], дефектов решетки кремния [6, 7], дефектов, создаваемых имплантацией ионов кислорода [8–10], фтора [11], ионов III и V групп [12], пластической деформацией кремния [13, 14] и так далее. Еще один эффективный способ увеличения квантового выхода люминесценции кремния – использование свойств наноструктурированного материала, в котором вследствие квантово-размерного эффекта происходит модификация зонной структуры. Нанокристаллы кремния уже применяют в оптоэлектронике [15, 16]. Перспективно их использование в элементах памяти [17, 18].

Для применения в электронике практический интерес представляют нанокристаллы кремния в широкозонной матрице. Как правило, их получают имплантацией кремния в SiO₂ с последующей высокотемпературной термообработкой [19–22].

Другой подход заключается в использовании в качестве матрицы фторида кальция, являющегося широкозонным диэлектриком, хорошо согласованным по параметру решетки с кремнием. Термическое испарение CaF_2 происходит без существенной диссоциации, что позволяет легко получать эпитаксиальные структуры $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$ в замкнутом технологическом цикле. Для получения нанокристаллов кремния в матрице CaF_2 потоки CaF_2 и Si , формирующиеся термическим испарением, направляют на подложку совместно. Такие слои, содержащие нанокристаллы кремния в матрице CaF_2 , обычно разделяют слоями диэлектрика для предотвращения образования крупных кристаллитов кремния. В этом качестве используют чистый фторид кальция. Для стимуляции образования нанокристаллов кремния применяют термообработку [23–25]. Кроме того, хорошо известно, что малая поверхностная энергия $\text{CaF}_2(111)$ обеспечивает трехмерный механизм роста Si на CaF_2 (по механизму Фольмера–Вебера). Следовательно, можно ожидать, что этот механизм роста будет действовать и при одновременном осаждении Si и CaF_2 на слое $\text{CaF}_2(111)$, способствуя образованию в матрице CaF_2 нанокристаллов кремния. Размеры нанокристаллов кремния и плотность их зарождения можно корректировать, меняя соотношение потоков Si и CaF_2 и температуру осаждения.

Целью настоящей работы было экспериментальное определение условий формирования нанокристаллов кремния в широкозонной матрице фторида кальция, способных излучать в видимой области спектра, и оптимизация технологических процессов получения таких структур.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Гетероструктуры $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ выращивали на подложках $\text{Si}(111)$ КДБ-20 в установке молекулярно-лучевой эпитаксии “Катунь-100” в замкнутом технологическом цикле. Пучок кремния формировался при электронно-лучевом испарении, фторида кальция — при испарении из источника резистивного типа с тиглем из стеклоуглерода. Потоки частиц кремния и фторида кальция калибровали в каждом эксперименте по осцилляциям интенсивности зеркального рефлекса при дифракции быстрых электронов в процессе эпитаксиального роста [26]. Стандартная предэпитаксиальная обработка подложек кремния включала стадии очистки в органических растворителях, травливание оксида в HF и формирование пассивирующего оксида в $\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{HNO}_3$. После загрузки подложки в камеру роста пассивирующий оксид удаляли в процессе отжига при температуре $\sim 700^\circ\text{C}$ в слабом потоке кремния. Затем при этой же темпера-

туре выращивали буферный слой Si до появления отчетливой дифракционной картины $\text{Si}(111)-(7 \times 7)$. После этого температуру подложки понижали до $\sim 330\text{--}340^\circ\text{C}$ и поддерживали постоянной на протяжении роста всей структуры. Давление в камере во время роста составляло $\sim 10^{-7}$ Па.

Все выращенные структуры для повышения интенсивности фотолюминесценции содержали 10 пар слоев $(\text{Si} + \text{CaF}_2)-\text{CaF}_2$. Первым выращивали разделительный слой CaF_2 , затем слой $(\text{Si} + \text{CaF}_2)$ и так далее. Для исключения образования нежелательных связей $\text{Si}-\text{O}$ формирование всех структур завершали слоем CaF_2 . Его толщина составляла 5–6 нм. В отличие от [23] слои $(\text{Si} + \text{CaF}_2)$ выращивали без ионизации потока фторида кальция.

Режимы роста структур приведены в табл. 1. Указаны номера образцов, температура подложки, скорости роста эпитаксиального слоя Si в калибровочном эксперименте, эпитаксиального слоя CaF_2 , отношение этих скоростей роста $(\text{CaF}_2 : \text{Si})$, толщина слоя $(\text{Si} + \text{CaF}_2)$ и разделительного слоя CaF_2 , режимы отжига. Отношение скоростей роста калибровочных слоев $\text{CaF}_2 : \text{Si}$ задает относительное содержание кремния в слое фторида кальция при совместном включении источников. Важно, чтобы это отношение не выходило за пределы диапазона 3.6–4.0. В противном случае структуры не люминесцируют. Для улучшения формирования нанокристаллов кремния в диэлектрической матрице полученные образцы подвергали отжигу. Были выращены две группы образцов (1, 2 и 3, 4), которые резко отличались режимами отжига. Структуры 1 и 2 отжигали в камере роста при температуре $\sim 650\text{--}700^\circ\text{C}$ в течение 10 мин, а структуры 3 и 4 подвергались импульсному отжигу галогенными лампами в атмосфере азота в течение 3 мин при температуре $\sim 670^\circ\text{C}$ (табл. 1).

Для возбуждения люминесценции использовали $\text{He}-\text{Cd}$ лазер с длиной волны излучения 325 нм. Спектры фотолюминесценции регистрировали с помощью двойного дифракционного монохроматора и кремниевой CCD -матрицы в ИФП СО РАН. Измерения проводились при комнатной температуре, фотолюминесценция наблюдалась невооруженным глазом в темном помещении.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены типичные спектры фотолюминесценции образцов первой и второй серий. Образцы серий 1 и 2 отличались толщиной разделительных слоев CaF_2 и соотношением потоков $\text{Si} : \text{CaF}_2$. Толщины слоев $(\text{Si} + \text{CaF}_2)$ образцов первой и второй серий были одинаковы.

Таблица 1. Режимы роста структур $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$

№ образца	Температура подложки, °C	Скорость роста Si, Å/с	Скорость роста CaF_2 , Å/с	Отношение скоростей роста $\text{CaF}_2 : \text{Si}$	Толщина слоя $(\text{Si} + \text{CaF}_2)$, Å	Толщина слоя CaF_2 , Å	Режим отжига
1	340	0.15	0.57	3.8	20	20	10 мин, 650°C, МЛЭ
2	340	0.1	0.36	3.6	20	10	10 мин, 650°C, МЛЭ
3	340	0.12	0.48	4.0	18	20	Импульсный, 3 мин в азоте, 670°C
4	340	0.16	0.6	3.75	24	20	Импульсный, 3 мин в азоте, 670°C

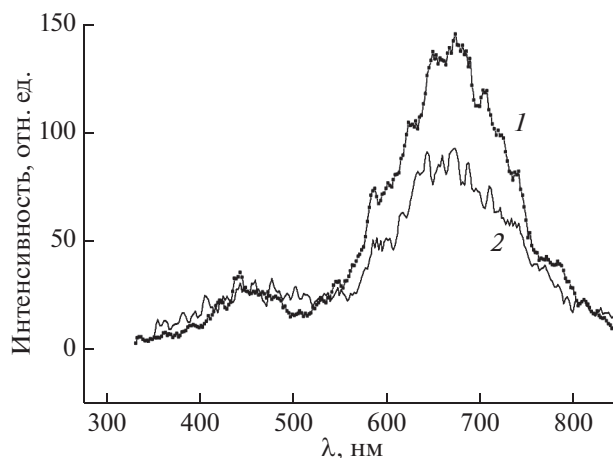
Примечание. МЛЭ — молекулярно-лучевая эпитаксия.

Спектры образцов первой серии содержат два максимума разной интенсивности. Более интенсивный наблюдается на длине волны 660 нм. Полная ширина на полувысоте составляет около 130 нм. Менее интенсивный — на длине волны 450 нм с полной шириной на полувысоте примерно 70 нм. Более интенсивный максимум излучения образцов второй серии наблюдается на длине волны 670 нм. Полная ширина на полувысоте составляет 150 нм. Менее интенсивный максимум наблюдается на длине волны 460 нм с полной шириной на полувысоте ~100 нм. Таким образом, спектры образцов первой и второй серий практически идентичны.

На рис. 2 и 3 приведены спектры фотолюминесценции образцов третьей и четвертой серий соответственно. От образцов серий 1 и 2 образцы серий 3 и 4 отличаются режимом отжига, а между собой — толщинами слоев $(\text{Si} + \text{CaF}_2)$. Максимум излучения образцов серии 3 наблюдается на длине волны 485 нм. Полная ширина на полувысоте составляет 148 нм (рис. 2а). В спектрах образцов серии 4 можно выделить два пика. Более интенсивный наблюдается на длине волны 534 нм с полной шириной на полувысоте 220 нм. Второй — на длине волны 650 нм с полной шириной около 25 нм (рис. 2б). (Второй пик можно увидеть и в спектрах образцов третьей серии, но он мал и плохо различим на фоне шумов). Из сравнения рис. 1 с рис. 2 и 3 следует, что спектры образцов первой, второй и третьей, четвертой серий отличаются на качественном уровне.

Для эффективной пространственной локализации носителей и модификации зонной структуры размер кремниевого нанокристалла не должен превышать боровский радиус экситона, что для кремния соответствует 4.9 нм. Квантово-размерный эффект проявляется в нанокристаллах кремния размером до 10 нм [27], что хорошо коррели-

рует с экспериментальными данными [28, 29], где авторы наблюдали эффект квантового ограничения в тонких (5–10 нм) слоях Si, расположенных между слоями CaF_2 . Вследствие быстрого затухания волновых функций носителей заряда в диэлектрической матрице фторида кальция размер области локализации волновых функций оказывается порядка размера нанокристалла кремния. Фотолюминесценция в видимом диапазоне спектра наблюдается только при толщине слоев кремния порядка 3 нм [30]. Режимы роста структур подбирали таким образом, чтобы обеспечить формирование в матрице CaF_2 монокристаллов кремния, соответствующих этим параметрам. Плотность нанокристаллов кремния и их средние размеры в матрице CaF_2 определяются, в основном, соотношением потоков Si и CaF_2 . Варьируя это соотношение, удалось установить, что люми-

**Рис. 1.** Спектры фотолюминесценции образцов первой (1) и второй (2) серий, $\lambda = 325$ нм.

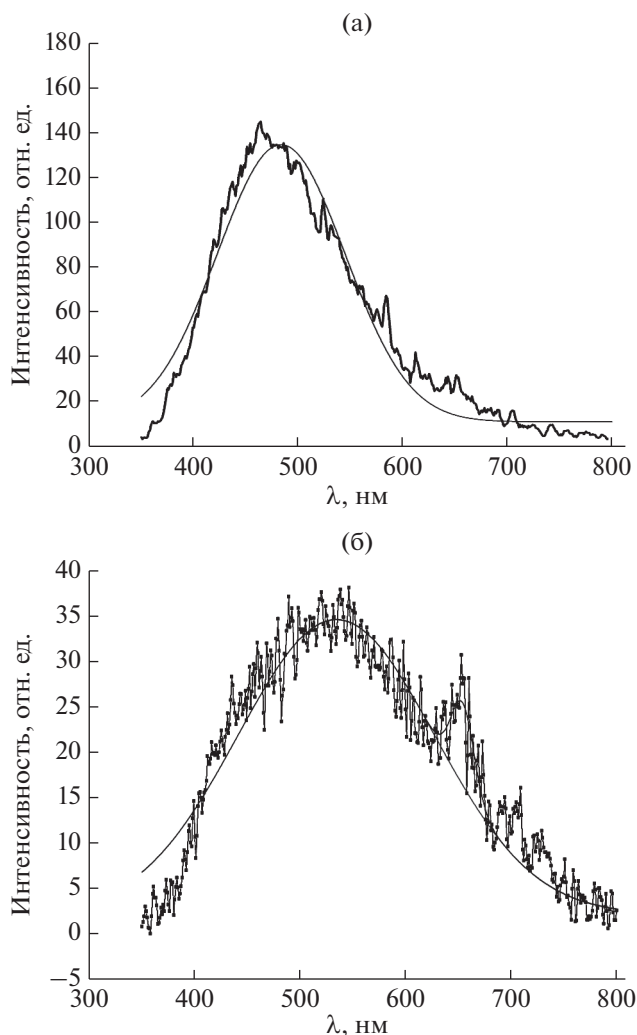


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции образцов третьей (а) и четвертой (б) серий (точки). Сплошные линии — аппроксимация спектров функцией Гаусса.

несценция в структурах $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ наблюдается только тогда, когда оно оказывается в диапазоне 3.6–4.0. Дополнительную коррекцию размеров кремниевых нанокристаллов можно получить с помощью отжига полученных структур.

Формирование нанокристаллов кремния в матрице CaF_2 в структурах $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ было подтверждено методом высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии. На рис. 4 приведено изображение поперечного среза десятипериодной гетероструктуры $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ образца 1, свидетельствующая об образовании в матрице фторида кальция нанокристаллов кремния с широким разбросом по размерам. Нанокристаллам кремния на изображении соответствуют светлые области. В отдельных областях образца наблюдаются

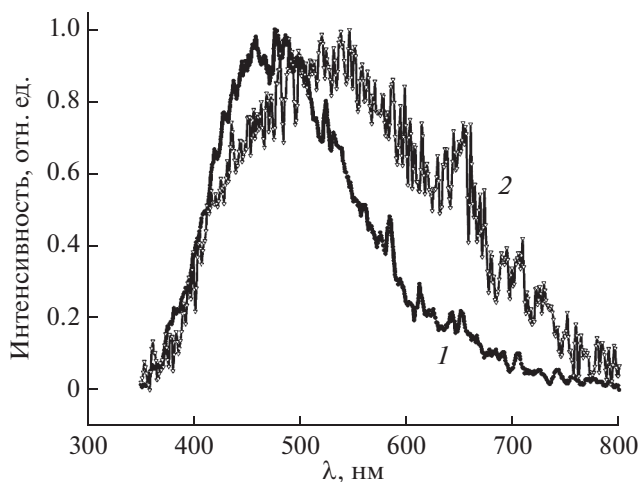


Рис. 3. Нормированные спектры фотолюминесценции образцов третьей (1) и четвертой (2) серий.

кристаллиты кремния макроскопического размера (порядка 40 нм) (рис. 4а). В других областях наблюдаются нанокристаллы размером менее 3 нм (рис. 4б), что соответствует условию наблюдения люминесценции в видимом диапазоне спектра.

Из рис. 1 видно, что при одинаковых толщинах слоев ($\text{CaF}_2 + \text{Si}$) спектры образцов серий 1 и 2 практически идентичны. Этого следовало ожидать, поскольку параметры слоев ($\text{CaF}_2 + \text{Si}$) у данных образцов одинаковы. Именно размеры нанокристаллов кремния определяют положения пика люминесценции при квантово-размерном эффекте. Кроме того, уменьшение скоростей роста слоев Si и CaF_2 в 1.5 раза при условии неизменности соотношения потоков $\text{CaF}_2 : \text{Si}$ в пределах 3.6–4.0 на положение максимумов не влияет, как и уменьшение от 2 до 1 нм толщины разделительных слоев CaF_2 . И то, и другое также вполне ожидаемо.

В образцах серий 3 и 4 изменение толщины слоя ($\text{CaF}_2 + \text{Si}$) от 1.8 до 2.4 нм приводит к сдвигу пика фотолюминесценции λ_{max} в сторону более длинных волн от 485 до 534 нм. Это находится в качественном соответствии с эффектом квантового ограничения (рис. 3). Значительная ширина пиков в спектрах излучения, вероятно, обусловлена разбросом нанокристаллов по размеру. Наличие двух пиков в спектрах фотолюминесценции, особенно очевидное для образцов серий 1 и 2 (рис. 1), также, вероятно, связано с разбросом нанокристаллов кремния по размеру. Так как размеры и плотность нанокристаллов кремния в основном определяются соотношением потоков Si и CaF_2 , которое у всех образцов варьировалось незначительно, оставаясь в выбранном диапазоне 3.6–4, единственным приемлемым объясне-

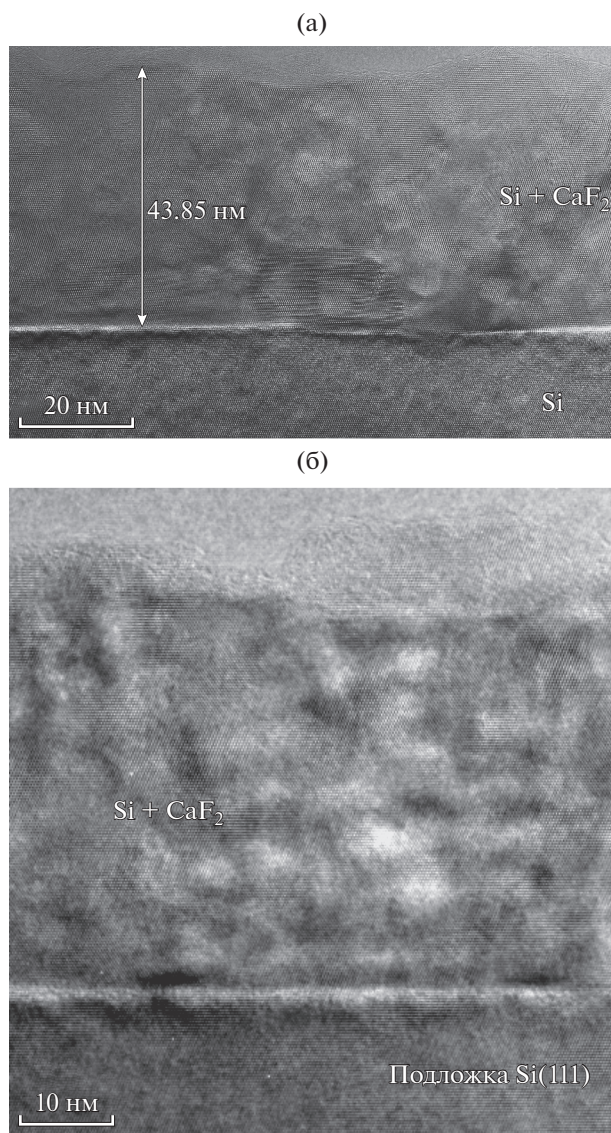


Рис. 4. Изображение десятипериодной структуры $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)$, полученное методом высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии с разным увеличением. Светлые области — нанокристаллы кремния.

нием отличия спектров образцов серий 1, 2 и 3, 4 являются различия в режимах отжига структур. Если положения максимумов спектра излучения определяются квантово-размерным эффектом, то следовало бы ожидать, что один из максимумов спектров излучения образцов серий 1 и 2 должен находиться между максимумами спектров излучения образцов серий 3 и 4, как это следует из соотношения толщин слоев $\text{CaF}_2 + \text{Si}$. В первом приближении это почти выполняется для максимума на длине волны 460 нм.

Грубая оценка размеров нанокристаллов кремния, соответствующих наблюдаемым при фото-

люминесценции значениям энергии [31, 32], дает 1.6–3.3 нм, что хорошо коррелирует с экспериментальными данными высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии и фотолюминесценции. Эти значения не совпадают с толщиной слоев $\text{Si} + \text{CaF}_2$ в исследуемых образцах. Следовательно, в структурах $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ формируются нанокристаллы кремния как меньшего, так и несколько большего размера, чем толщина слоя $\text{Si} + \text{CaF}_2$. Вероятно, в результате изменения режимов отжига соотношение между количеством нанокристаллов разных размеров меняется, что проявляется в появлении дополнительных пиков в спектрах фотолюминесценции. Следовательно, длина волны, соответствующая пику спектра фотолюминесценции в полученных структурах, определяется не столько толщиной слоя $(\text{Si} + \text{CaF}_2)$, сколько размерами объемных нанокристаллов кремния, находящихся внутри этих слоев. Данный вывод также коррелирует с оценкой размеров квантовых точек, которые и незначительно превышали толщину слоя $(\text{Si} + \text{CaF}_2)$, и были меньше нее. Определение влияния режимов отжига на плотность и размеры нанокристаллов кремния требует более детального исследования.

ВЫВОДЫ

В замкнутом технологическом цикле методом молекулярно-лучевой эпитаксии получены многослойные гетероструктуры $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$, содержащие нанокристаллы кремния и излучающие в видимом диапазоне спектра при комнатной температуре. Выявлено влияние соотношения потоков Si и CaF_2 и режимов отжига на оптические свойства структур. Подобраны параметры технологического процесса для получения структур, способных излучать в видимом диапазоне спектра. Длины волн, соответствующие максимумам спектров фотолюминесценции, хорошо согласуются с расчетами длины волны излучения за счет эффекта квантового ограничения при размерах квантовых точек 1.6–3.3 нм, а разброс размеров нанокристаллов кремния, полученный на основе данных высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии, находится в разумном соответствии с шириной полосы излучения. Полученные структуры могут быть использованы для создания интегральных оптоэлектронных компонентов и устройств, совместимых с технологией кремниевых интегральных схем [33].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Canham L.T.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. № 10. P. 1046.
<https://doi.org/10.1063/1.103561>
2. *John G.C., Singh V.A.* // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. № 8. P. 5329.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.50.5329>
3. *Латухина Н.В., Лизункова Д.А., Рогожина Г.А. и др.* // Фотоника. 2018. Т. 12. № 5. С. 508.
<https://doi.org/10.22184/1993-7296.2018.12.5.508.513>
4. *Franzo G., Priolo F., Coffia S. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. P. 2235.
<https://doi.org/10.1063/1.111655>
5. *Emelyanov A.M., Sobolev N.A., Yakimenko A.N.* // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. P. 1223.
<https://doi.org/10.1063/1.121020>
6. *Kveder V., Badylevich V., Steinman E. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. P. 2106.
<https://doi.org/10.1063/1.1689402>
7. *Шкляев А.А., Латышев А.В., Ичикава М.* // ФТП. 2010. Т. 44. Вып. 4. С. 452.
8. *Соболев Н.А., Калядин А.Е., Шек Е.И., Штельмах К.Ф.* // ФТП. 2017. Т. 51. С. 1182.
<https://doi.org/10.21883/FTP.2017.09.44880.8561>
9. *Соболев Н.А., Калядин А.Е., Коновалов М.В. и др.* // ФТТ. 2016. Т. 58. С. 2411.
<https://doi.org/10.21883/ftt.2016.12.43865.199>
10. *Калядин А.Е., Штельмах К.Ф., Аруев П.Н. и др.* // ФТП. 2020. Т. 54. С. 580.
<https://doi.org/10.21883/FTP.2020.06.49389.9369>
11. *Соболев Н.А., Калядин А.Е., Сахаров В.И. и др.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 1. С. 14.
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.01.4408416420>
12. *Власукова Л.А., Комаров Ф.Ф., Пархоменко И.Н. и др.* Свечение ионно-имплантированного кремния в ИК-диапазоне: люминесценция от дислокаций и нанокристаллов A_3B_5 // Матер. 12-й Международ. конф. "Взаимодействие излучений с твердым телом". Минск, 2017. С. 219.
13. *Нагорных С.Н., Павленков В.И., Тетельбаум Д.И. и др.* // Изв. вузов. Матер. электрон. техн. 2014. Т. 17. № 4. С. 252.
<https://doi.org/10.17073/16093577-2014-4-252-256>
14. *Kveder V., Steinman E. A., Shevchenko S.A., Grimmeiss H.G.* // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. P. 10520.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.10520>
15. *Pavesi L., Dal Negro L., Mazzoleni C. et al.* // Nature. 2000. V. 408. P. 440.
<https://doi.org/10.1038/35044012>
16. *Boyraz O., Jalali B.* // Opt. Express. 2004. V. 12. Iss. 21. P. 5269.
<https://doi.org/10.1364/OPEX.12.005269>
17. *Lu T.Z., Alexe M., Scholz R. et al.* // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. № 1. P. 01431.
<https://doi.org/10.1063/1.2214300>
18. *Ng C.Y., Chen T.P., Ding L. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. № 6. P. 063103.
<https://doi.org/10.1063/1.2172009>
19. *Zhang Qi, Bayliss S.C., Hutt D.A.* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. P. 1977.
<https://doi.org/10.1063/1.113296>
20. *Ioannou-Sougleridis V., Kamenev B., Kouvatso D.N., Nassiopoulou A.G.* // Mater. Sci. Eng. 2003. V. 101. P. 324.
[https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(02\)00733-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(02)00733-X)
21. *Терехов В.А., Теруков Е.И., Ундалов Ю.К., Паринова Е.В.* // ФТП. 2016. Т. 50. Вып. 2. С. 212.
<https://doi.org/10.1134/S1063782616020251>
22. *Неизвестный И.Г., Володин В.А., Камаев Г.Н. и др.* // Автометрия. 2016. Т. 52. № 5. С. 84.
<https://doi.org/10.15372/AUT20160510>
23. *Watanabe M., Matsunuma T., Maruyama T., Maeda Y.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. V. 37. P. 591.
<https://doi.org/10.1143/JJAP.37.L591>
24. *Maruyama T., Nakamura N., Watanabe M.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2000. V. 39. P. 1996.
<https://doi.org/10.1143/JJAP.39.1996>
25. *Maruyama T., Nakamura N., Watanabe M.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1999. V. 38. P. L904.
<https://doi.org/10.1143/JJAP.38.L904>
26. *Величко А.А., Илюшин В.А., Крупин А.Ю. и др.* // Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 9. С. 33.
<https://doi.org/10.7868/S020735281609016X>
27. *Михайлов А.Н., Белов А.И., Марычев М.О. и др.* Физические основы ионно-лучевого формирования и свойства квантовых точек кремния в диэлектрике (учебно-методический комплекс). Нижний Новгород: ННГУ, 2010. 66 с. <http://www.unn.ru/pages/e-library/methodmaterial/2010/32.pdf>
28. *Ioannou-Sougleridis V., Ouisse T., Nassiopoulou A.G. et al.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. Iss. 1. P. 610.
<https://doi.org/10.1063/1.1330551>
29. *Bassani F., Menard S.* // Phys. Stat. Sol. 1998. V. 165. № 49. P. 49.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-396X\(199801\)165:1<49::AID-PSSA49>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-396X(199801)165:1<49::AID-PSSA49>3.0.CO;2-L)
30. *Ioannou-Sougleridis V., Nassiopoulou A.G., Ouisse T., Bassani F.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. Iss. 13. P. 2076.
<https://doi.org/10.1063/1.1405004>
31. *Бурдов В.А.* // ФТП. 2002. Т. 36. Вып. 10. С. 1233.
32. *Белолипецкий А.В., Нестоклон М.О., Ясиевич И.Н.* // ФТП. 2018. Т. 52. Вып. 10. С. 1145.
<https://doi.org/10.21883/FTP.2018.10.46454.8859>
33. Патент 2642132 (РФ). Оптоэлектронное устройство / НГТУ. Величко А.А., Крупин А.Ю., Гавриленко В.А. // Заявл. 20.07.2016. Оpubл. 24.01.2018. Бюл. № 3.

Influence of Growth Modes of $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ Heterostructures on the Photoluminescence Spectrum

A. A. Velichko¹, A. Yu. Krupin^{1,*}, N. I. Filimonova^{1,**}, V. A. Ilyushin¹

¹The Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073 Russia

*e-mail: mirazh@eml.ru

**e-mail: ninafilimonova@ngs.ru

This work is devoted to the study of the influence of the conditions for the formation of $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ structures on their emissivity in the visible region of the spectrum. The multilayer $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ heterostructures were grown on Si(111) substrates by molecular beam epitaxy in a closed technological cycle. Photoluminescence was excited by He—Cd laser with a radiation wavelength of 325 nm. The spectra were measured at room temperature. The parameters of the technological process were selected for obtaining structures capable of emitting in the visible range of the spectrum. It was found experimentally that luminescence in the $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ structures was observed only when the ratio of the Si and CaF_2 fluxes was 3.6–4.0. A 1.5-fold decrease in the growth rates of Si and CaF_2 layers, as well as a decrease in the thickness of the CaF_2 separation layers to 1 nm, was shown to not affect the position of the maxima in the photoluminescence spectra. A change in the annealing mode for the $\text{CaF}_2/(\text{Si} + \text{CaF}_2)/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ structures resulted in a change in the maximum position in the photoluminescence spectra. The estimation of the sizes of silicon nanocrystals corresponding to the energies observed during photoluminescence correlated well with the experimental data of both high-resolution transmission electron microscopy and photoluminescence.

Keywords: photoluminescence, molecular beam epitaxy, calcium fluoride, heterostructures, silicon nanocrystals.