

Сегнетоэлектрические фотонные кристаллы на основе наноструктурированного цирконата-титаната свинца

© Ф.Ю. Сычев, Т.В. Мурзина, Е.М. Ким, О.А. Акципетров

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, Россия

E-mail: fsychev@shg.ru

Приводятся первые результаты, полученные при создании одномерных сегнетоэлектрических фотонных кристаллов на основе наноструктурированного цирконата-титаната свинца и пористого кремния. Образцы характеризовались методами спектроскопии линейного коэффициента отражения и спектроскопии второй оптической гармоники.

Работа выполнена при поддержке грантов INTAS N 03-51-3784, Российского фонда фундаментальных исследований № 04-02-16847 и 03-02-39011.

В последнее время фотонные кристаллы (ФК) и микрорезонаторы на их основе являются объектами интенсивных исследований. Интерес к этим структурам обусловлен их уникальными оптическими свойствами, связанными с существованием так называемой фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ). Наличие ФЗЗ открывает широкие перспективы применения ФК в устройствах оптоэлектроники [1,2], а также позволяет наблюдать новые оптические и нелинейно-оптические эффекты в этих структурах [3,4].

Пористый кремний является одним из широко используемых материалов для изготовления ФК [5,6]. Одномерные ФК могут быть получены путем периодического изменения пористости, что приводит к пространственной модуляции показателя преломления пористого кремния и образованию ФЗЗ в некотором частотно-угловом диапазоне спектра [6]. Кроме того, существует возможность заполнения пор различными веществами и получения ФК с различными свойствами на базе шаблонов пористого кремния. В настоящей работе приводятся первые данные по созданию одномерных сегнетоэлектрических ФК и микрорезонаторов на основе наноструктурированного цирконата-титаната свинца (ЦТС), внедренного в шаблон ФК из пористого кремния.

Интерес к сегнетоэлектрическим ФК объясняется прежде всего тем, что кристаллическая структура сегнетоэлектриков в сегнетоэлектрической фазе не обладает инверсной симметрией. Следствием этого является наличие объемной дипольной квадратичной восприимчивости, что может быть использовано, например, для получения интенсивной генерации второй оптической гармоники (ВГ). Если из сегнетоэлектрического материала изготовить ФК или микрорезонатор, этот отклик может быть значительно усилен за счет эффектов локализации поля и выполнения условий фазового синхронизма. Также представляет интерес возможность контролируемого изменения свойств ФК и микрорезонаторов. Диэлектрическая проницаемость и, следовательно, показатель преломления сегнетоэлектриков зависят от температуры и внешнего электростатического поля. Следовательно,

положением ФЗЗ и разрешенной микрорезонаторной моды сегнетоэлектрического ФК можно управлять путем изменения температуры и наложения электростатического поля.

Фотонные кристаллы на основе ЦТС были получены по следующей методике. На первом этапе методом электрохимического травления кремния *p*- и *n*-типа изготавливался ФК или микрорезонатор. Использовался кристаллический кремний ориентации (001), что приводило к образованию пор в направлении, перпендикулярном поверхности пластины. Средний диаметр пор, определяемый методом атомно-силовой микроскопии, составлял около 10 nm в кремнии *p*-типа и около 100 nm в кремнии *n*-типа. Затем образец отжигался при температуре 900°C. На втором этапе в полученный ФК внедрялся золь ЦТС, это обеспечивало частичное заполнение пор ФК (или микрорезонаторов). После этого образец подвергался температурной обработке в соответствии с процедурой, принятой для золь-гель-технологии изготовления поликристаллических пленок ЦТС, а именно выдерживался 10 min при 180°C, затем 30 min при 450°C и 60 min при 900°C. Были исследованы спектры линейного отражения полученных образцов, а также спектры интенсивности отраженной ВГ. При проведении нелинейно-оптических экспериментов в качестве зондирующего было использовано излучение оптического параметрического генератора света в диапазоне длин волн 700–1200 nm с длительностью импульса 10 ns и пиковой мощностью около 1 MW/cm².

Для ФК и микрорезонаторов наблюдается смещение ФЗЗ и микрорезонаторной моды соответственно, обусловленное частичным заполнением пор шаблона золем ЦТС. На рис. 1 приведены спектры линейного коэффициента отражения образцов микрорезонаторов на основе кремния *p*-типа с внедренным золем ЦТС и без него. Оба образца были подвергнуты температурной обработке. Величина спектрального сдвига составляет около 50 nm, что по оценкам соответствует степени заполнения пористой структуры кристаллическим ЦТС, равной 10–15%. Также наблюдается увеличение спектральной ширины ФЗЗ.

На рис. 2, *a* представлены спектры линейного коэффициента отражения ФК на основе кремния *n*-типа с внедренным золем ЦТС и без него, подвергнутых температурной обработке. Величина спектрального сдвига

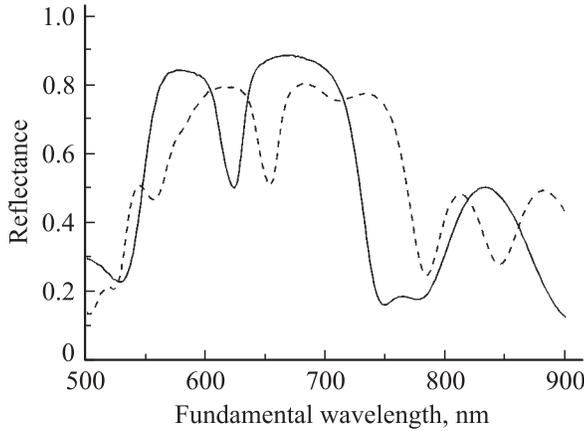


Рис. 1. Спектры линейного коэффициента отражения микрорезонатора на основе кремния *p*-типа. Сплошная линия — образец без ЦТС, штриховая — с внедренным в структуру золем ЦТС.

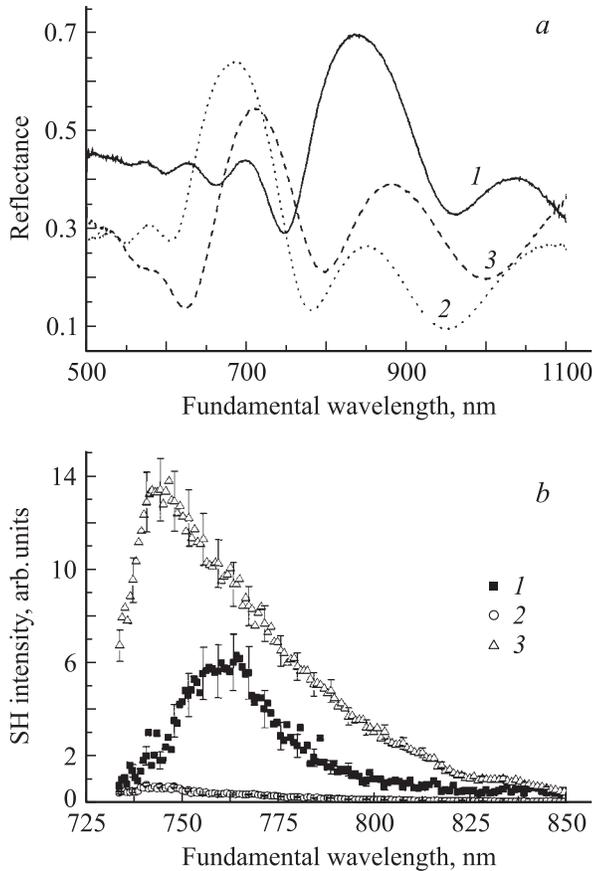


Рис. 2. Спектры линейного коэффициента отражения фотонных кристаллов на основе кремния *n*-типа (*a*) и спектры интенсивности ВГ тех же образцов (*b*). 1 — неотожженный образец без ЦТС, 2 — отожженный образец без ЦТС, 3 — отожженный образец с внедренным ЦТС.

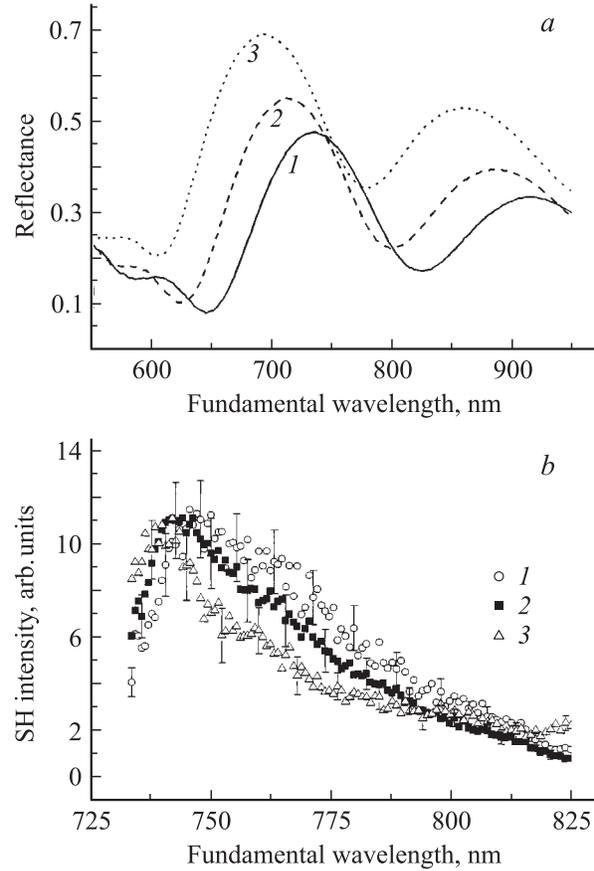


Рис. 3. Спектры линейного коэффициента отражения отожженного фотонного кристалла на основе кремния *n*-типа с внедренным ЦТС (*a*) и спектры интенсивности ВГ (*b*) при различных углах падения излучения. Угол падения θ , deg: 1 — 30, 2 — 45, 3 — 60.

ФЗЗ составляет около 50 nm. На рисунке также приведен спектр неотожженного образца без ЦТС. На рис. 2, *b* представлены спектры интенсивности отраженной ВГ этих образцов. О сегнетоэлектрическом упорядочении ЦТС в структуре пористого кремния можно судить по значительному возрастанию сигнала ВГ после высокотемпературного отжига образца с ЦТС, вызванному образованием в пористой структуре полярной фазы нанокристаллитов ЦТС. Интенсивность ВГ в максимуме для образца с внедренным ЦТС превосходит интенсивность в максимуме образца без ЦТС более чем в 20 раз. Также для сравнения приведен спектр интенсивности ВГ образца без ЦТС, не подвергавшегося температурной обработке. Интенсивность ВГ данного образца примерно в 3 раза меньше, чем в случае образца с ЦТС. Усиление интенсивности ВГ происходит вследствие выполнения условий фазового синхронизма на краях ФЗЗ [2]. Для неотожженного образца без ЦТС это усиление наблюдается на переднем (коротковолновом) крае ФЗЗ, тогда как на заднем (длинноволновом) оно практически отсутствует. В случае отожженных образцов с внедренным ЦТС и без него усиление интенсивности ВГ наблюдается для

длинноволнового края ФЗЗ. Существует ли для этих образцов усиление на переднем крае ФЗЗ, в данном случае сказать нельзя, поскольку их ФЗЗ выходят за пределы диапазона используемого параметрического генератора света.

На рис. 3 приведены спектры линейного коэффициента отражения и спектры интенсивности отраженной ВГ отожженного ФК с внедренным ЦТС при углах падения излучения на образец $\theta = 30, 45$ и 60° . С увеличением угла падения ФЗЗ фотонного кристалла сдвигается в сторону меньших длины волн (рис. 3, *a*). При $\theta = 30^\circ$ центр ФЗЗ лежит около 735 nm, при $\theta = 45^\circ$ около 715 nm, при $\theta = 60^\circ$ около 695 nm. Такое поведение ФЗЗ является типичным для одномерных ФК. Как видно из спектров интенсивности ВГ при тех же углах падения излучения, максимум интенсивности также сдвигается при изменении угла: он расположен около 748, 743 и 739 nm при $\theta = 30, 45$ и 60° соответственно (рис. 3, *b*).

Таким образом, в данной работе развит метод внедрения ЦТС в пористую структуру ФК и микрорезонаторов на основе пористого кремния. Обнаружено усиление интенсивности ВГ в 20 раз в сегнетоэлектрическом ФК на основе наноструктурированного ЦТС. Выявлен сдвиг ФЗЗ и максимума интенсивности ВГ сегнетоэлектрического ФК при изменении угла падения излучения на структуру.

Список литературы

- [1] S.G. Johnson, J.D. Joannopolous. *Acta Mater.* **51**, 5823 (2003).
- [2] C. Weisbuch, H. Benisty, R. Houdre. *Int. J. High Speed Electron. Phys.* **10**, 339 (2000).
- [3] T.V. Dolgova, A.I. Maidykovski, M.G. Martemyanov, A.A. Fedyanin, O.A. Aktsipetrov, G. Marowsky, V.A. Yakovlev, G. Mattei. *Appl. Phys. B* **81**, 2723 (2002).
- [4] A. Fainstein, B. Jusserand, V. Thierry-Mieg. *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3765 (1995).
- [5] L. Pavesi. *Microelectron. J.* **27**, 437 (1996).
- [6] F. Muller, A. Birner, U. Gösele, V. Lehmann, S. Ottow, H. Foll. *J. Porous Mater.* **7**, 201 (2000).