

ГЕТЕРОЭПИТАКСИЯ СУЛЬФИДА СВИНЦА НА КРЕМНИИ

*В.П.Бондаренко, Н.Н.Ворозов, В.В.Дикарева,
А.М.Дорофеев, В.И.Левченко, Л.И.Постнова,
Г.Н.Троянова*

Эпитаксиальные пленки халькогенидов свинца, в том числе сульфида свинца, перспективны для разработки многоэлементных гальваномангнитных, термоэлектрических и оптоэлектронных (ИК диапазона) сенсоров, предназначенных для регистрации физических полей с высокими пространственным и временным разрешением. Для функционирования этих устройств необходимы достаточно сложные электронные схемы обработки сигналов, которые могут быть реализованы методами интегральной технологии на основе кремния. Получение гетероэпитаксиальных слоев PbS на Si позволило бы совместить матрицу первичных преобразователей и схему обработки в компактное, надежное и дешевое устройство. К сожалению, прямая эпитаксия сульфида свинца на кремнии крайне затруднена из-за значительного несоответствия постоянных кристаллической решетки ($\sim 9.4\%$) и коэффициентов термического расширения ($\sim 1000\%$) этих материалов [1]. Эпитаксиальные пленки халькогенидов свинца, приемлемого для использования в оптоэлектронных приборах качества, к настоящему времени удалось получить лишь с применением промежуточного многослойного буфера на основе фторидов кальция и бария [1,2]. Однако технология получения указанных многослойных структур сложна, требует применения дорогостоящего оборудования и плохо совместима со стандартной кремниевой технологией.

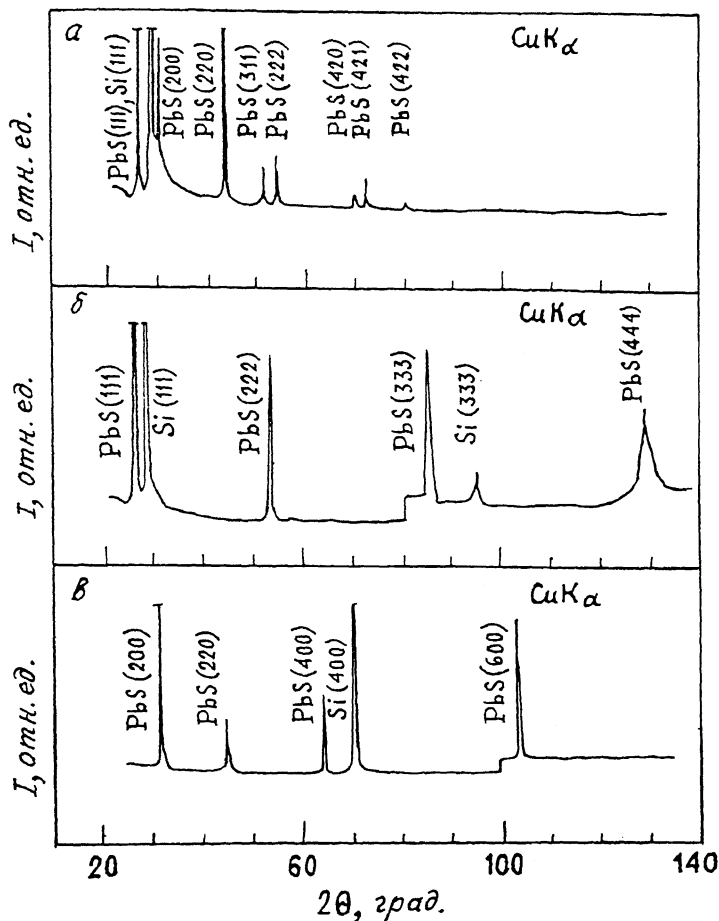
В настоящей работе показана возможность использования в качестве буфера для гетероэпитаксии сульфида свинца на кремнии, специально сформированного в приповерхностной области монокристаллической пластины пористого слоя. Технология получения пористого кремния проста, хорошо отработана в связи с многолетним использованием его для формирования изолирующих областей и полностью совместима с технологией кремниевых интегральных схем [3,4]. С 1990 г. интерес к пористому кремнию еще более возрос в связи с интенсивным исследованием люминесценции этого материала в видимой области спектра [5,6].

Совершенная монокристаллическая структура пористого кремния позволяет реализовать на нем ориентированный рост, а огромное количество наноразмерных пор обеспечивает возможность управляемого изменения его кристаллофизических свойств [7,8]. Однако к настоящему времени опубликовано всего несколько работ по гетероэпитаксии на пористом кремнии: твердого раствора SiGe [9] и GaAs [10-12]. Возможность использования пористого слоя в качестве буфера при гетероэпитаксии материалов с сильно отличающимися от кремния кристаллографическими параметрами практически не исследована.

В качестве подложек для гетероэпитаксии пленок сульфида свинца были использованы пластины монокристаллического кремния ориентации (111) и (100), равномерно легированного сурьмой до концентрации $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Буферный пористый слой толщиной 5 мкм и пористостью 30% был сформирован методом анодной электрохимической обработки в растворе фтористоводородной кислоты в изопропиловом спирте при плотности тока 50 мА/см^2 .

Пленки сульфида свинца были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии. В качестве исходных веществ использовались предварительно синтезированный нелегированный сульфид свинца с контролируемой концентрацией собственных стехиометрических дефектов и элементарная сера. Скорость роста определялась интенсивностью пучка PbS. Управление типом проводимости и концентрацией носителей заряда осуществлялось регулированием интенсивности пучка серы. Процесс осаждения проводился одновременно на контрольных подложках из исходного кремния ориентации (111) (без пористого слоя) и подложках ориентации (111) и (100) с буферным пористым слоем. Температура роста составляла 365°C , скорость роста — около 0.4 нм/с . Значения указанных параметров были выбраны из опыта эпитаксии сульфида свинца на классических для этого материала подложках из фторида бария. Специальная оптимизация параметров роста на пористом кремнии не проводилась. После завершения роста пленки охлаждались до комнатной температуры со скоростью $\sim 0.1^\circ\text{C/с}$. Кристаллическая структура полученных пленок контролировалась методом рентгеновской дифрактометрии.

На рисунке приведены рентгеновские дифрактограммы пленок сульфида свинца *p*-типа проводимости с концентрацией носителей заряда $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 1.1 мкм, выращенных на контрольной подложке (а) и подложках с ориентацией (111) (б) и (100) (в) с буферным пористым слоем. Осажденная на контрольной кремниевой подложке пленка PbS была поликристаллической. Исследование морфологии по-



Рентгеновские дифрактограммы пленок PbS на подложках.

a — Si(111), *b* — Si(111) с пористым буферным слоем, *v* — Si(100) с пористым буферным слоем.

казало, что поверхность PbS покрыта сеткой микротрещин неправильной геометрической формы. Незначительные механические или термические воздействия приводили к отслаиванию отдельных фрагментов пленки. Все это является следствием значительного различия параметров решеток и коэффициентов термического расширения сульфида свинца и кремния.

Кристаллографическая ориентация пленок, выращенных на пористом буферном слое (см. рисунок, *b*, *v*), совпадала

с ориентацией кремниевой подложки, что свидетельствует об эпитаксиальной природе их роста.

Поверхность пленки ориентации (111) была гладкой, без видимых дефектов. Механические и термические воздействия, характерные для процесса фотолитографии, не приводили к ухудшению ее адгезии или изменению морфологии. Полуширина кривой качания рентгеновского рефлекса (111) не превышала типичных значений этого параметра для пленок PbS, получаемых на подложках из фторида бария.

Поверхность пленки, выращенной на подложке ориентации (100), была покрыта сеткой микротрещин. Однако эта сетка, в отличие от поликристаллической пленки, полученной на контрольной подложке, была прямоугольной, что характерно для монокристаллического слоя ориентации (100). Наличие на рентгеновской дифрактограмме рефлекса (220) может быть объяснено ростом соответствующих кристаллитов на трещинах, образующихся на определенной стадии роста. Наличие трещин в пленках ориентации (100), вероятно, связано с неоптимальностью параметров пористого слоя на пластинах этой ориентации.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что использование буферного слоя пористого кремния позволяет осуществить эпитаксию на кремнии материалов, существенно отличающихся по своим параметрам от подложки. Можно предположить, что это связано со способностью пористого кремния эффективно демпфировать механические напряжения, возникающие вследствие несоответствия параметров кристаллической решетки и коэффициентов термического расширения пленки и подложки. Механизм этого эффекта требует детального исследования. Однако его практическое значение, а также актуальность дальнейших исследований по оптимизации параметров буферного слоя пористого кремния и условий роста пленок PbS на нем представляются очевидными.

Список литературы

- [1] Zogg H., Masek J., Maissen C., Blunier S., Weibel H. // Thin Solid Films. 1990. V. 184. P. 247-255.
- [2] Zogg H., Huppi M. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. P. 133-135.
- [3] Бондаренко В.П., Борисенко В.Е. // Зарубежная электронная техника. 1989. В. 9. С. 55-84.
- [4] Бондаренко В.П., Долгий Л.Н., Яковцева В.А. // Матер. междунар. конф. "Микроэлектроника-90". Минск, 1990. Т. 2. С. 27-29.
- [5] Canham L.T. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. N 10. P. 1046-1048.
- [6] Gaponenko S.V., Germanenko I.N., Petrov E.P., Stupak A.P., Bondarenko V.P., Dorofeev A.M. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. N 1. P. 81-83.

- [7] *Labunov V.A., Bondarenko V.P., Glinenko L.K., Dorofeev A.M., Tabulina L.V.* // *Thin Solid Films*. 1986. V. 137. N 1. P. 123-134.
- [8] *Labunov V.A., Bondarenko V.P., Borisenko V.E., Dorofeev A.M.* // *Phys. Stat. Sol. (a)*. 1987. V. 102. P. 193-198.
- [9] *Xie Y.H., Bean J.C.* // *J. Appl. Phys.* 1990. V. 67. N 2. P. 792-795.
- [10] *Lin T.L. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1987. V. 51. N 11.
- [11] *Yasegawa S., Maehashi K., Nakashima H.* // *J. Crystal Growth*. 1989. V. 95. P. 113-116.
- [12] *Bondarenko V., Troyanova G., Kovyazina T., Komarov F. et al.* // *Abstr. 17th Int. Conf. Def. Semicond. Gmunden, Austria*. 1993. P. 192.

Институт физики твердого тела
и полупроводников АН Беларуси
Минск

Поступило в Редакцию
9 января 1994 г.

Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Минск
