

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА $Pb_{1-x}Sn_xSe\langle Cd, Zn\rangle$ Прозоровский В. Д., Решидова И. Ю., Таряник Н. В.,
Браташевский Ю. А.

В настоящее время $Hg_{1-x}Cd_xTe$, $Pb_{1-x}Sn_xTe$ и $Pb_{1-x}Sn_xSe$ являются перспективными материалами для решения проблем тепловидения [1, 2]. Однако проблема технологии изготовления материала $Hg_{1-x}Cd_xTe$ для удовлетворения матричной фотоэлектроники еще полностью не решена из-за неоднородного распределения основных элементов по объему кристалла, что очень важно для создания многоэлементных приемников. По сравнению с $Hg_{1-x}Cd_xTe$ существующая технология для халькогенидов свинца ($Pb_{1-x}Sn_xTe$, $Pb_{1-x}Sn_xSe$) позволяет получать распределение элементов с высокой степенью однородности по объему кристалла; кроме того, разработан более простой и контролируемый метод отжига кристаллов с целью понижения концентрации дефектов [2]. Однако имеется еще один аспект проблемы, связанный с большой величиной статической диэлектрической проницаемости решетки кристалла халькогенидов свинца ϵ_L , что существенно понижает чувствительность и обнаружительную способность приемников инфракрасного излучения [1, 3].

В этой связи для более эффективного практического применения халькогенидов свинца важным является целенаправленное исследование зависимости диэлектрической проницаемости решетки кристалла от концентрации и типа легирующих примесей, которые способствовали бы уменьшению ϵ_L при возможном сохранении остальных характеристик материала (подвижности, концентрации свободных носителей заряда).

Ранее было установлено [4-6], что в этих материалах ϵ_L уменьшается с увеличением концентрации свободных носителей заряда, поставщиками которых, как известно, являются вакансии металла и халькогена [7], дающие по два свободных носителя противоположных зарядов. При этом сравнение образцов одного состава и равной концентрации свободных носителей заряда показало, что величина ϵ_L существенно меньше в образцах p -типа, т. е. в образцах, у которых число катионных преобладает над числом анионных вакансий [6]. Уменьшение ϵ_L с увеличением концентрации вакансий и ее различие по величине в образцах n - и p -типа авторы [6] связывают соответственно с различным искажением решетки кристалла в окрестности катионной и анионной вакансий из-за разности ионных радиусов металла и халькогена, что приводит к различию кулоновского взаимодействия между ионами, окружающими вакансию того или иного типа, а также к различной величине лоренцевского и среднего макроскопического полей. Вследствие этого для образцов n - и p -типа с одними и теми же составом и концентрацией вакансий ϵ_L различаются по величине.

Поэтому есть основание предполагать, что в процессе легирования $Pb_{1-x}Sn_xSe$ изовалентными примесными атомами, ионные радиусы которых отличаются от радиусов ионов, замещаемых в исходной решетке, поляризация и диэлектрическая проницаемость решетки будут существенно изменяться.

С целью проверки приведенных предположений были приготовлены образцы $Pb_{1-x}Sn_xSe$ p -типа с $x=0.08$ и концентрацией дырок $\sim 10^{19}$ см⁻³. Одна партия из этих образцов отжигалась в парах того же состава, но с избытком паров свинца, а другая — в парах кадмия.

Приготовленные таким образом образцы исследовались с помощью геликоновой интерферометрии. Образцы имели форму плоскопараллельных дисков диаметром 5—6 и толщиной 0.4—0.6 мм, в которых кристаллографическая ось 4-го порядка была перпендикулярна плоскости образца. Исследование дисперсии геликона в образцах проводилось в конфигурации Фарадея на радиоспектрометре, работающем на частоте 36 ГГц с циркулярной поляризацией микроволнового поля и со статическим магнитным полем, медленно меняющимся от 0 до 60 кЭ. Определение концентрации свободных носителей заряда N , их подвижности μ и ϵ_L проводилось по осцилляционной кривой, представляющей собой производную коэффициента отражения по магнитному полю dR/dH ,

с помощью минимизации квадратичного функционала [8]. Для того чтобы правильно оценить то влияние, которое оказывает легирующая примесь на диэлектрические свойства исходного материала, из обеих партий образцов для сравнения выбирались образцы, у которых после отжига концентрация дырок была примерно одинаковой. Результаты машинной обработки кривых dR/dH показали, что в процессе отжига в обеих партиях образцов N уменьшалась до $1.15 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а ϵ_L в измеряемом интервале температур 1.8—40 К оказалась меньше в 1.8 раза в кристаллах, отожженных в парах Cd. Так, например, при 4.35 К в образцах первой партии $\epsilon_L \approx 1912$, а второй — $\epsilon_L \approx 1062$. Подвижность дырок в образцах второй партии уменьшилась на 8—10 % по сравнению с первой.

Аналогичное исследование диэлектрических свойств, изменяющихся в результате легирования вещества, было проведено на образцах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$ ($x = 0.08, 0.09$), легированных и не легированных цинком. В подобранных для сравнения образцах, отожженных в парах цинка, и в образцах, отожженных в парах того же состава с избытком паров свинца, при 5 К концентрация электронов проводимости оказалась равной $2.79 \cdot 10^{17}$ и $5.48 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ соответственно для образцов с $x=0.08$ и 0.09. Результаты данного исследования показали, что диэлектрическая проницаемость решетки в образцах, отожженных в парах Zn, оказалась примерно в 2 раза меньше, чем в образцах, отожженных с избытком паров свинца. Так, для образцов с $x=0.08$ и 0.09, отожженных в парах цинка, ϵ_L при 5 К соответственно равна 1100 и 1947, а для образцов, отожженных с избытком паров свинца, — 2210 и 4264, что свидетельствует о зависимости диэлектрических свойств вещества от легирующей примеси, в данном случае Zn, ионный радиус которого меньше радиусов замещаемых ионов металла в исходной решетке. Что касается подвижности электронов проводимости, то μ для образцов, как легированных Zn, так и не легированных Zn, имеет примерно одну и ту же величину.

Согласно вышеизложенным представлениям о связи концентрации свободных носителей заряда и ϵ_L с концентрацией и типом вакансий, можно сказать, что легирование кристаллов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$ кадмием и цинком, ионные радиусы и поляризуемость которых меньше, чем в Pb^{+2} , приводит к уменьшению концентрации свободных носителей, а также к уменьшению ϵ_L относительно тех кристаллов, в которых достигнута та же величина концентрации свободных носителей, что и при замещении вакансий атомами Pb. Уменьшение ϵ_L в данном случае происходит, по всей видимости, благодаря меньшей поляризуемости Cd^{+2} и Zn^{+2} , чем Pb^{+2} , искажению решетки кристалла в окрестности малого радиуса (Cd^{+2} и Zn^{+2}), а также изменению структурного коэффициента внутреннего поля, создаваемого молекулами или ионами, находящимися внутри сферы Лоренца [9], относительно структурного коэффициента в кристаллах, отожженных в парах того же состава с избытком паров Pb.

Таким образом, проведенные исследования указывают на то, что легирование $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$ кадмием и цинком существенно способствует уменьшению статической диэлектрической проницаемости решетки кристалла по сравнению с нелегированными кристаллами при одной и той же концентрации свободных носителей заряда в обоих случаях.

Авторы благодарны К. Б. Толпыго за полезное обсуждение результатов работы.

Список литературы

- [1] Лябченко А. В., Сальков Е. А., Спзов Ф. Ф. Физические основы полупроводниковой инфракрасной фотоэлектроники. Киев, 1984. 254 с.
- [2] Гавалешко Н. П., Горлей П. Н., Шендеровский В. А. Узкозонные полупроводники. Получение и физические свойства. Киев, 1984. 289 с.
- [3] Шоль Ж., Марфлан И., Мюшш М., Торель П., Комбет П. Приемники инфракрасного излучения. М., 1969. 294 с.
- [4] Jantsch W., Lopez-Otero A. // Proc. 13 Int. Conf. Phys. Semicond. Rome, 1976. P. 487—490.
- [5] Браташевский Ю. А., Прозоровский В. Д., Харионовский Ю. С. // ФНТ. 1977. Т. 3. В. 2. С. 249—251.
- [6] Браташевский Ю. А., Прозоровский В. Д., Пырегов Б. П., Ршидова И. Ю. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 2. С. 272—275.

- [7] Parada N. J., Pratt G. W. // Phys. Rev. Lett. 1969. V. 22. N 5. P. 180—182.
 [8] Прозоровский В. Д., Решидова И. Ю., Браташевский Ю. А., Пырегов Б. П. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 7. С. 1325—1327.
 [9] Богородицкий Н. П., Волокобинский Ю. М., Воробьев А. А., Тареев Б. М. Теория диэлектриков. М.—Л., 1965. 344 с.

Донецкий физико-технический институт
АН УССР

Получено 15.12.1988
Принято к печати 10.01.1989

ФТП, том 23, вып. 5, 1989

О РАЗМЕРАХ УПОРЯДОЧЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ В НЕКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОМ КРЕМНИИ

Сванбаев Е. А., Таурбаев Т. И.

Экспериментальные исследования последних лет показали, что некристаллический сплав кремния с водородом можно получить в виде аморфного или микрокристаллического гидрогенизированного кремния, обозначаемых как $a\text{-Si} : \text{H}$ и $mk\text{-Si} : \text{H}$ соответственно. Спектры дифракционного отражения «качественного» $a\text{-Si} : \text{H}$ хорошо описываются моделью непрерывной случайной сетки Полка, модифицированной включением 20 % неустойчивых тетраэдрических конфигураций. Интерпретация свойств $mk\text{-Si} : \text{H}$ обычно ведется на основе двухфазной модели, по которой микрокристаллы (МК) окружены межгранулярным неупорядоченным материалом (НМ). Подробные результаты исследования этих материалов приведены в [1-3].

В данной работе рассмотрена возможность описания структур $a\text{-Si} : \text{H}$ и $mk\text{-Si} : \text{H}$ в рамках однофазного микрокристаллитного представления.

На рис. 1, а схематически показана двухфазная модель структуры $mk\text{-Si} : \text{H}$. Микрокристаллы (заштрихованные области) со средним размером δ разделены НМ толщиной $2a$. Доля объема с упорядоченным расположением атомов составляет $x = V / (V + V_1)$, где V — объем среднего по размеру МК, V_1 — объем НМ, приходящегося на один МК. Конкретизируя форму усредненного по размеру МК, можно оценить среднюю толщину неупорядоченного материала, покрывающего микрокристалл.

Согласно экспериментальным данным [1], для $mk\text{-Si} : \text{H}$, легированного бором, $x = 0.5$ и $\delta = 6$ нм, отсюда следует $a \approx 0.8$ нм. Для качественного $mk\text{-Si} : \text{H}$ [2] $x = 0.65 \div 0.97$ и $\delta \approx 4 \div 6$ нм, что приводит к значению a в интервале $0.3 \div 0.04$ нм порядка межатомного расстояния a_0 . Следовательно, НМ не может присутствовать в виде отдельной фазы, а представляет собой часть поверхностных атомов микрокристаллов.

Далее рассмотрим однофазную модель структуры $mk\text{-Si} : \text{H}$, представленную схематически на рис. 1, б, где штрихами отмечен монослой атомов на поверхности МК. Из-за хаотической ориентации микрокристаллов друг относительно друга на их границах возникают области с неупорядоченным расположением атомов толщиной порядка двух моноатомных слоев. На такой малой толщине не может локализоваться деформация, что говорит о существовании механизма, эффективно снижающего межкристаллитные напряжения. В $mk\text{-Si} : \text{H}$ эти напряжения могут быть значительно снижены за счет замены деформированных $\text{Si}-\text{Si}$ -связей на $\text{Si}-\text{H}$ -связи. Поэтому концентрация водорода в качественном некристаллическом гидрогенизированном кремнии должна быть больше, чем требуется для пассивации оборванных связей.

Полагая, что два монослоя на границах МК при структурных измерениях создают фон, характерный для неупорядоченного материала, оценим зависимость x от среднего размера МК из соотношения $x = (V - V_0) / V$. Здесь V —