

УЗКОЗОННЫЙ ДЕТЕКТОР ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СПЛАВА $Cd_{1-x}Sn_xS$

Е.В. Поляков, Ю.А. Брусенцов, А.М. Минаев

Кафедра «Материалы и технология конструкционных материалов», ТГТУ

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: инфракрасное излучение; механизм проводимости; фоточувствительность; фототок; халькогениды; энергия активации.

Аннотация: Изучен механизм проводимости полупроводникового сплава $Cd_{1-x}Sn_xS$, исследовано влияние концентрации легирующего компонента на энергию активации полупроводника и спектральное распределение фоточувствительности, в соответствии с которым выбрана математическая модель, описывающая влияние параметров детектора и длины волны инфракрасного излучения на изменение фототока. Проверена адекватность модели электрофизическим процессам, протекающим в детекторе при облучении инфракрасным излучением, дана метрологическая характеристика результатов измерений.

Инфракрасное излучение (ИК) может использоваться для получения и обработки информации (информационное применение) и как средство активного технологического воздействия на материальные среды (технологическое применение). Оба они основываются на развитии средств генерации и регистрации инфракрасного излучения. Для информационного применения характерной является задача обнаружения собственного излучения объектов инфракрасного излучения, рассеянного или отраженного наблюдаемым объектом при его освещении.

В настоящее время перспективы развития фотоэлектроники определяются прогрессом в технологии многоэлементных матриц фотоприемников – преобразователей изображения и возможностями реализации счета отдельных фотонов.

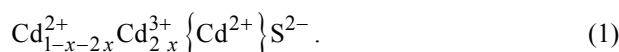
Известно [1], что наиболее полно требованиям инфракрасной фотоэлектроники диапазона 1,5 – 14 мкм удовлетворяют тройные твердые растворы – халькогениды свинца и ртути: сплавы КРТ (кадмий, ртуть, теллур) и СОТ (свинец, олово, теллур). Особенности производства фотоэлементов на основе соединений теллура и ртути связаны с применением технологии высокого уровня сложности, с использованием токсичных материалов и дорогостоящего оборудования.

Целью настоящей работы является исследование возможности получения нового более технологичного и безопасного узкозонного материала, чувствительного к ИК излучению.

Ранее в [2] нами были изучены свойства тройного сплава $Cd_xSn_{1-x}S$ для использования его в качестве чувствительного материала тонкопленочного детектора ИК излучения. Результаты исследований показали, что данный сплав является перспективным для детектирования в инфракрасной области спектра электромагнитного излучения.

Для более полного представления о физических процессах в исследуемом нами материале и описания механизма переноса заряда, рассмотрим процесс проводимости с точки зрения, так называемого, «перескокового» механизма.

Стехиометричный CdS – собственный полупроводник (точнее диэлектрик, так как все связи заполнены: число связей кадмия равно числу связей серы). В реальном сульфиде кадмия должны быть вакансии $\{Cd^{2+}\}$. Принимая во внимание тот факт, что синтез материала в подобных соединениях проводится при избытке серы, следует предполагать наличие катионных вакансий $\{Cd^{2+}\}$. Появление катионов Cd^{2+} нарушит электронейтральность, поэтому часть катионов Cd^{2+} должны изменить валентность $Cd^{2+} \rightarrow Cd^{3+}$, отдав недостающие электроны сере. Структурная формула при сохранении условия электронейтральности примет вид



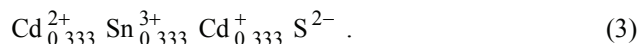
Наличие разновалентных катионов Cd^{2+} и Cd^{3+} обеспечит направленную передачу заряда (проводимость) почти без затраты энергии.

Рассмотрим поведение легированного оловом CdS.

Легирование оловом (совместный синтез системы CdS–SnS) приведет к избытку электронов и нарушению электронейтральности, для сохранения которой часть кадмия изменит валентность: $Cd^{2+} \rightarrow Cd^{+}$. Учитывая это, структурная формула сплава будет



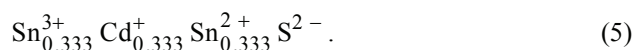
Из формулы следует, что чем более легирован сульфид кадмия оловом, тем больше концентрация разновалентных катионов Cd^{+} , Cd^{2+} , а значит и выше проводимость. Максимальную проводимость следует ожидать в случае, когда появится наибольшее количество разновалентных катионов. Эта ситуация реализуется при $x = 0,333$, то есть



При дальнейшем увеличении содержания олова ($x > 0,333$) количество разновалентных катионов Cd уменьшится, а сопротивление возрастет и достигнет максимума, когда не останется катионов Cd^{2+} , то есть



В соответствии с данной формулой наибольшее сопротивление будет при значении $x = 0,5$. Дальнейшее легирование оловом приведет к замещению Cd^{+} . В этом случае вновь нарушится электронейтральность, компенсировать которую можно лишь за счет изменения валентности олова $Sn^{3+} \rightarrow Sn^{2+}$. Появление разновалентных катионов Sn^{3+} и Sn^{2+} приведет к увеличению проводимости, а значит уменьшению сопротивления, наименьшее значение которого будет при значении $x = 0,666$, то есть



Увеличение концентрации олова ($x > 0,666$) приведет к уменьшению количества разновалентных катионов Sn, что, в свою очередь, вызовет увеличение сопротивления. При значении показателя $x = 1$, сопротивление достигнет очередного максимума, а структурная формула сплава примет вид



Результаты анализа механизма проводимости говорят о том, что зависимость электросопротивления сплава от концентрации компонентов имеет два минимума: при значениях $x = 0,333$ и $0,666$. Так как исследуемый материал является полупроводником, в котором передача заряда осуществляется «прыжковым» механизмом, а на количество свободных носителей влияет только концентрация легирующего компонента, то можно утверждать, что зависимость энергии активации сплава от концентрации тоже будет неравномерной. Ее максимумы должны соответствовать минимумам значений проводимости сплава $\text{Cd}_{1-x}\text{Sn}_x\text{S}$. Это подтверждается результатами эксперимента, в котором по влиянию температуры на электросопротивление тонкопленочных образцов исследована зависимость энергии активации сплава $\text{Cd}_{1-x}\text{Sn}_x\text{S}$ от концентрации компонентов (CdS и SnS) в интервале значений x от 1 до 0,6 (рис. 1). Из графика видно, что энергия активации в значительной степени зависит от концентрации компонентов. Поэтому на основе данного материала можно создавать полупроводники с заданной энергией активации в диапазоне от 0,6 до 0,09 эВ.

Для математического описания процессов, протекающих в детекторе при освещении ИК излучением, была использована зависимость (7), полученная авторами [1]. Она отражает связь спектральной фоточувствительности полупроводника с энергией облучающей волны. Из нее следует, что если за счет излучения мощностью P_c в полупроводниковом кристалле (рис. 2) создается дополнительный заряд, то фототок равен

$$I_{\phi} = \frac{e}{h\nu} (1 - R^0) \alpha \beta P_c d \left(\frac{\tau n \mu_n U}{l^2} \right), \quad (7)$$

где α – коэффициент поглощения, изменяющийся по закону

$$\alpha \approx \exp \left[- \frac{(h\nu - E_g)^2}{\gamma^2} \right], \quad (8)$$

e – заряд электрона; $h\nu$ – энергия кванта; R^0 – коэффициент отражения; β – квантовый выход внутреннего фотоэффекта; d, l – толщина и длина пленочного детектора соответственно; U – напряжение в цепи детектора; τ – время жизни носителей; μ – под-

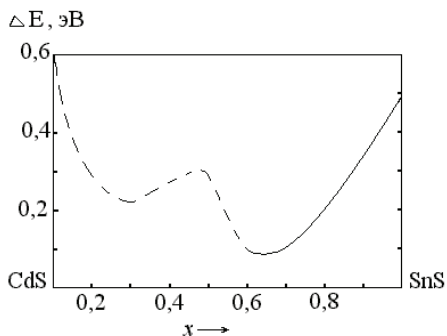


Рис. 1 Зависимость энергии активации сплава $\text{Cd}_{1-x}\text{Sn}_x\text{S}$ от концентрации компонентов CdS и SnS: сплошная линия – экспериментальные данные, пунктир – предполагаемое поведение кривой на основе расчетных данных

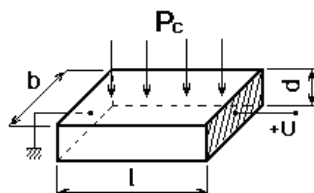


Рис. 2 К расчету фотопроводимости

вижность носителей; E_g – энергия активации полупроводникового материала; γ – постоянная (для узкозонных материалов ≈ 10 мэВ).

С целью исследования чувствительности детекторов к ИК излучению построено спектральное распределение фотопроводимости, определяющее зависимость фоточувствительности полупроводника от энергии (длины волны) падающего излучения. Для этого образцы освещались вольфрамовой вакуумной лампой накаливания мощностью 40 Вт через ИК монохроматические фильтры фирмы КОРНИНГ, США. При освещении образцов происходило резкое возрастание сигнала фотопроводимости, особенно в области фундаментального поглощения в связи с ростом коэффициента поглощения, когда $h\nu \approx E_g$. При определенной энергии фотона, близкой к ширине запрещенной зоны, кривая фоточувствительности достигает максимума, а затем спадает в области сильного поглощения. По уравнению (7) было построено спектральное распределение фоточувствительности сплава $Cd_{0,4}Sn_{0,6}S$ для ИК диапазона (рис. 3).

Видно, что на участке от 16 до 12,5 мкм фототок растет. Это обусловлено тем, что на полупроводник воздействует излучение с большей энергией. В связи с этим увеличивается подвижность носителей и время их жизни. Также на данном участке кривой с увеличением энергии волны изменяется и коэффициент поглощения. Максимальное значение фотопроводимости достигается в случае, когда образец освещает волна с энергией, соответствующей энергии активации полупроводника ($\lambda = 12 - 12,5$ мкм). В этом случае, в соответствии с (8), весь свет полностью поглощается, а подвижность и время жизни носителей достигают наивысшего значения. На участке 12 – 8 мкм спад фототока связан с изменением коэффициента поглощения, а также уменьшением подвижности носителей, исходя из зонной теории строения полупроводника.

При оценке адекватности модели по критерию Фишера установлено, что на участке 12 – 12,5 мкм модель является адекватной. На участках 16 – 12,5 мкм и 12 – 8 мкм для корректировки модели были введены в виде дополнительных множителей коэффициенты 1,04 и 1,06 соответственно. После этого математическая

модель стала адекватной электрофизическим процессам, происходящим в детекторе ИК излучения.

Метрологический анализ результатов измерения проводился в соответствии с методикой, приведенной в [3]. Для этого был использован экспериментальный тонкопленочный ПИП ИК излучения с наименьшей энергией активации – $Cd_{0,4}Sn_{0,6}S$ со следующими характеристиками: $d = 0,3$ мкм; $l = 5$ мм; $\tau = 3 \times 10^{-6}$ с, $\alpha = 1$ см $^{-1}$, $\mu = 5 \times 10^5$ см 2 / (В \times с); $\lambda = 12,5$ мкм; $U = 3$ В; $R_0 = 0,5$.

Значения абсолютных погрешностей были взяты из паспортных данных задающих и контролирующих приборов.

Расчет погрешностей показал, что разработанный ПИП для измерения интенсивности ИК излучения с удовлетворительной точностью способен фиксировать ИК излучение с длиной волны 12÷13 мкм.

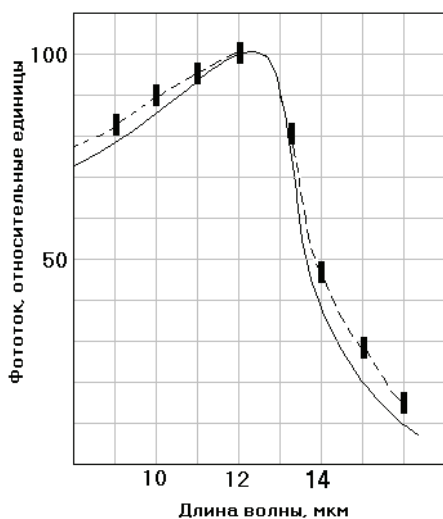


Рис. 3 Спектральное распределение фоточувствительности сплава $Cd_{0,4}Sn_{0,6}S$ для ИК диапазона: сплошная линия – расчетные данные, точки – экспериментальные

В результате экспериментальных исследований, математического и метрологического анализа данных, можно сделать вывод о том, что данная методика позволяет создавать детекторы, работающие в узком и заданном диапазоне ИК излучения путем подбора значения x таким образом, чтобы энергия активации сплава $Cd_xSn_{1-x}S$ была соизмерима с энергией облучаемой волны.

Список литературы

1. Физические основы полупроводниковой инфракрасной фотоэлектроники. Современные тенденции, новые материалы / А.В. Любченко, Е.А. Сальков, Ф.Ф. Сизов. – Киев: Наукова думка, 1984. – 256 с.
2. Поляков Е.В., Брусенцов Ю.А., Минаев А.М. Использование сплава $Cd_xSn_{1-x}S$ в детекторах электромагнитных излучений инфракрасного и видимого спектров // Вестник ТГТУ. – 2001. – Т. 7, №1. – С. 101 – 105.
3. Рего К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений: Справочное пособие.–К.: Техніка, 1987. – 128 с.

Narrow Zone Detector of Infra-red Radiation on the Basis of Alloy $Cd_{1-x}Sn_xS$

E.V. Polyakov, Yu.A. Brusentsov, A.M. Minaev

Department «Materials and Technology», TSTU

Key words and phrases: activation energy; chalcogens; infra-red radiation; mechanism of conduction; photo-sensitivity.

Abstract: Conduction mechanism of semi-conductor alloy $Cd_{1-x}Sn_xS$ is studied. The influence of alloy component concentration on the activation energy of semi-conductor and spectrum distribution of photosensitivity is investigated. Mathematical model describing the influence of detector parameters and the length of infra-red radiation length on the photoelectric current change is chosen. Adequacy of model to electro-physical processes, taking place in the detector under the infra-red radiation processing is tested, metrological characteristic of measurement results is given.

Engzonendetektor der Infrarotausstrahlung aufgrund der Legierung $Cd_{1-x}Sn_xS$

Zusammenfassung: Es ist der Mechanismus der Leitungsfähigkeit der Halbleiterlegierung $Cd_{1-x}Sn_xS$ und der Einfluß der Konzentration der Legierungskomponente auf die Energie der Aktivierung des Halbleiters und die spektrale Verteilung der Fotoempfindlichkeit untersucht, entsprechend der das matematische Modell, das den Einfluß der Parameter des Detektors und der Länge der Welle der Infrarotausstrahlung auf die Veränderung des Fotostromes beschreibt, gewählt ist. Es ist die Angemessenheit des Modells den elektrophysischen Prozessen, die im Detektor bei der Bestrahlung von der Infrarotausstrahlung verlaufen, geprüft. Es ist die metrologische Charakteristik der Ergebnisse der Messungen gegeben.

Détecteur d'infrarouges à zone étroite à la base de l'alliage $Cd_{1-x}Sn_xS$

Résumé: On a étudié le mécanisme de la conductibilité de l'alliage semi-conducteur $Cd_{1-x}Sn_xS$, ainsi que l'influence de la concentration du composant alliant sur l'énergie de l'activation du semi-conducteur et sur la répartition spectrale de la photosensibilité compte tenu de laquelle est choisi le modèle mathématique décrivant l'influence des paramètres du détecteur et de la longueur de l'onde de l'émission des rayons infrarouges sur le changement du photocourant. On a contrôlé l'adéquation du modèle par le processus électrophysique qui se déroule dans le détecteur au cours de l'irradiation par l'émission des rayons infrarouges. On a donné la caractéristique métrologique des résultats des mesures.
