

УДК 621.315

В.Н. Давыдов, И.М. Мусина, А.С. Гребенников

Влияние фоновой засветки на электрические свойства фоторезисторов из селенида кадмия

В результате исследования шумовых свойств фоторезистора на основе CdSe установлено, что при фоновой засветке определенной мощности имеет место минимум шума на зависимости спектральной плотности шумового напряжения от напряжения смещения. Исследованы зависимости параметров обнаруженного минимума шума от мощности фоновой засветки. Предполагается, что возможной причиной его появления является протекание фотоструктурных преобразований в полупроводнике за счет захвата неравновесных дырок.

Ключевые слова: селенид кадмия, фоновая засветка, минимум шума, фотоструктурные преобразования.

В настоящее время основное внимание к полупроводниковым соединениям $A^{II}B^{VI}$ связано с их оптическими свойствами и высокой чувствительностью к оптическому излучению. На их основе изготавливают фоточувствительные элементы, электронно-лучевые приборы и приборы ночного видения, модуляторы и дефлекторы оптического излучения и т.д. Они также находят применение в нанoeлектронике в качестве материала квантовых ям. Однако в силу специфики структуры полупроводники $A^{II}B^{VI}$, в частности CdS, могут проявлять нестабильность свойств при действии оптического излучения, приводящую к изменениям электрических параметров изготовленных на их основе приборов [1]. Данных по влиянию оптического излучения на электрические свойства приборов из CdSe в литературе мало, что сдерживает практическое применение этого материала в опто- и нанoeлектронике.

С другой стороны, известно [2, 3], что изучение шумовых свойств полупроводниковых приборов и структур в сочетании с внешними воздействиями способно дать информацию, недоступную другим методам. Так, наличие фоновой засветки способно качественно и количественно изменить шумовые свойства полупроводникового прибора, изготовленного из кремния и соединений $A^{III}B^V$ (GaAs, InSb) [4, 5]. В зависимости от механизма формирования шума и условий измерения при фоновой засветке он может как увеличиться, так и уменьшиться. Эти изменения могут использоваться как для практических разработок, так и научных исследований, поскольку помогают глубже понять механизмы перестройки дефектной структуры полупроводника при допороговых воздействиях. Учитывая практическое применение материала CdSe, исследование его шумовых свойств актуально для разработчиков высокочувствительных фотоприемных устройств, где шумы фотоэлемента определяют обнаружительную способность всего устройства.

В данной работе исследуются полевые и спектральные зависимости шумового напряжения $U_{ш}$, а также напряжения фотопроводимости $U_{фп}$ фоторезистора из селенида кадмия при различных уровнях его фоновой засветки с целью определения условий уменьшения величины шумов в данном полупроводниковом материале.

Образцы и методика измерения. В качестве образцов для исследования использовались промышленно выпускаемые фоторезисторы марок СФ3-4Б и ФР-764, изготовленные из селенида кадмия со структурой вюрцита. Фоторезисторы из полупроводника n -типа проводимости представляли собой тонкую пленку с размерами фоточувствительной площадки $L^2 = (5,8 \times 5,8)$ мм и темновым сопротивлением R^0 от 3 до 15 МОм. Освещаемая поверхность пленки покрывалась просветляющим покрытием из TiO_2 толщиной около 70 нм. Ширина запрещенной зоны селенида кадмия $\Delta E_g = 1,74$ эВ, подвижности электронов и дырок составляли соответственно $\mu_n = 800$ см²/(В·с), $\mu_p = 50$ см²/(В·с).

Экспериментальные исследования проводились на аппаратно-программном комплексе, собранном на базе микрочипа ADuC812 [6]. Комплекс позволяет измерять фотоэлектрические и шумовые свойства полупроводниковых приборов с предельной точностью, задаваемой 12-разрядными циф-

ровыми модулями: цифроаналоговыми преобразователями, аналого-цифровым преобразователем, а также генератором двоичного слова. С помощью последнего достигается программное управление работой внешних устройств, в частности генератора синусоидального сигнала, используемого для исследования кинетических свойств фотопроводимости фоторезисторов. В качестве источника фоновой засветки использовался синий или красный светодиод с программно регулируемой мощностью излучения. Измерение спектральной плотности шумового напряжения проводилось с помощью селективного нановольтметра «Упiран 237» на фиксированной частоте из диапазона (10 Гц – 100) кГц с полосой пропускания 1 Гц. Обработка экспериментальных результатов включала в себя программное подавление скачков шума в моменты изменения подаваемого с ЦАПa напряжения смещения, устранение случайных ошибок измерения применением процедуры накопления результатов измерений и их усреднением. Программное построение экспериментальных зависимостей исключало случайные ошибки оператора.

Приводимые ниже результаты измерений представляют собой типичные зависимости, полученные в результате большого числа измерений на нескольких образцах.

Экспериментальные результаты. Исследовались зависимости шумового напряжения $U_{ш}$ фоторезистора марки СФ3-4Б, измеренной на заданной частоте регистрации в единичной полосе частот, от величины прикладываемого к фоторезистору постоянного напряжения V при действии фоновой засветки регулируемой мощности $P_{ф}$. На рис. 1, а–в показаны типичные зависимости $U_{ш}(V)$ при различных значениях $P_{ф}$, измеренной в относительных единицах. Из рисунков следует, что, увеличение $P_{ф}$ приводит к появлению глубокого минимума шума в области средних значений V с последующим ростом, а затем уменьшением его глубины и перемещением в область малых V .

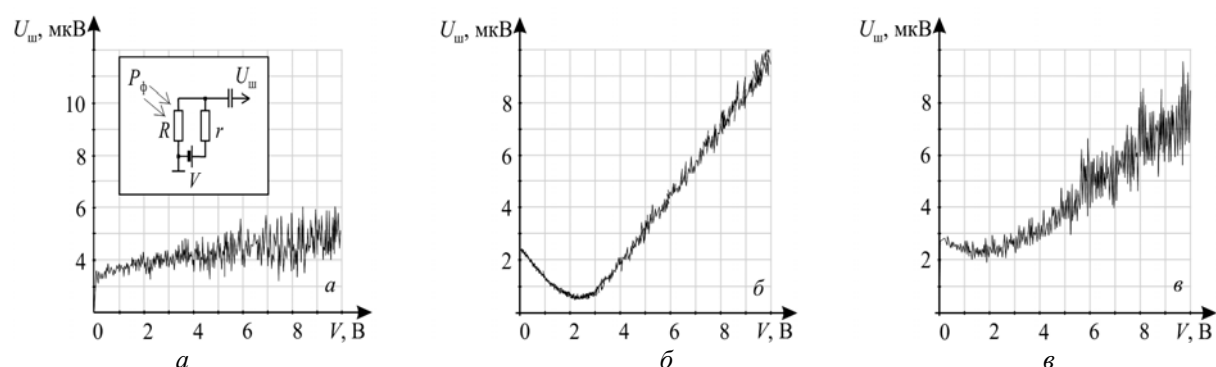


Рис. 1. Зависимость спектральной плотности шумового напряжения $U_{ш}(V)$ фоторезистора марки СФ3-4Б на частоте 1 кГц в отсутствие фоновой засветки (а), при $P_{ф}=3$ отн. ед. (б), при $P_{ф}=10$ отн. ед. (в). На вставке – входная цепь схемы регистрации сигнала с фоторезистора

Описанные изменения зависимости $U_{ш}(V)$ сопровождаются изменением низкочастотных (на частотах ниже 1 Гц) флуктуаций шума в области больших напряжений (фликкер-шум): в области малых и больших значений $P_{ф}$ наблюдаются большие флуктуации фликкер-шума, в то время как вблизи минимума шума уровень этих флуктуаций мал.

Результаты исследования поведения минимума шума с ростом мощности засветки $P_{ф}$ представлены на рис. 2. На вставке рисунка показано определение параметров минимума шума: V_{min} – положение минимума на оси напряжений (кривая 1); ΔV_{min} – полуширина минимума (2), $\Delta U_{ш}$ – глубина минимума (3). Видно, что указанные параметры резко уменьшаются с ростом мощностей засветки. Только глубина минимума в области малых $P_{ф}$ имеет подъем, сменяющийся спадом при $P_{ф}>3,5$ отн. ед.

Установлено, что минимум шума имеет место как на низких, так и на высоких частотах измерения в единичной полосе частот, а также при измерении интегрального шума в полосе частот

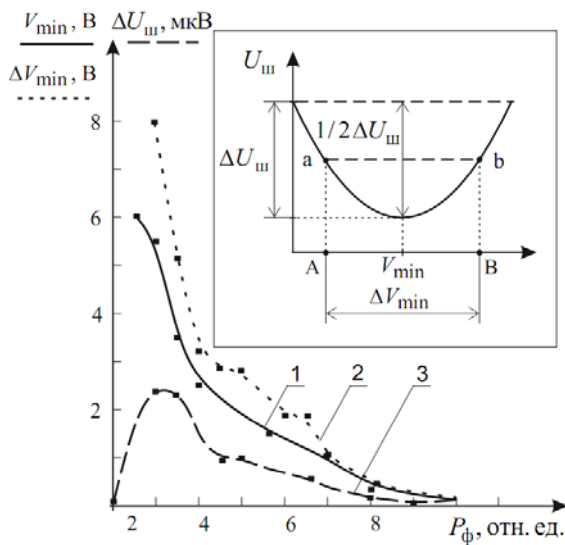


Рис. 2. Зависимости параметров минимума от мощности фоновой засветки

(10^1-10^5) Гц. Наличие минимума шума и его параметры не зависят от знака напряжения смещения фоторезистора V . Длительная засветка под напряжением приводит к частичному ослаблению эффекта. Однако он в значительной степени восстанавливает свои параметры после выдержки фоторезистора в течение нескольких часов при комнатной температуре, отсутствие засветки и напряжения.

Исследование фотоэлектрических и шумовых свойств фоторезисторов марки ФР-764 также показало наличие особенностей спектральной плотности шумового напряжения от напряжения смещения и мощности фоновой засветки (см. рис. 3, а-в): при значениях $P_φ = (3-4)$ отн. ед. в области напряжений $V > 5$ В обнаружена группа следующих друг за другом минимумов шума. С ростом мощности засветки глубины минимумов уменьшались, а сами минимумы смещались в область больших напряжений смещения.

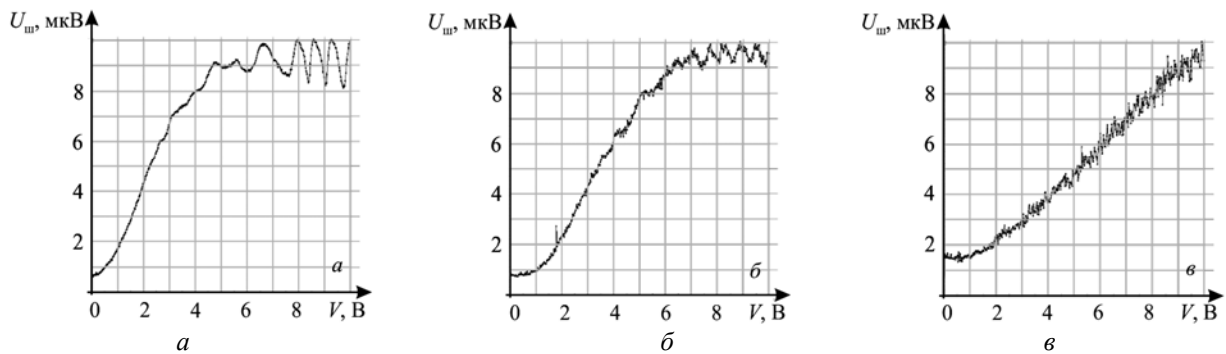


Рис. 3. Зависимости спектральной плотности шумового напряжения от напряжения $U_{ш}(V)$ на частоте 1 кГц фоторезистора марки ФР-764 при $P_φ = 3$ отн. ед. (а), 6 отн. ед. (б) и 10 отн. ед. (в)

Сходство поведения спектральной плотности шума фоторезисторов разных марок при действии напряжения смещения и фоновой засветки свидетельствует о единой природе минимумов шума, связываемой в первую очередь со свойствами материала фоторезистора – CdSe.

Необходимо отметить, что в зависимости от величины напряжения смещения напряжение фотопроводимости $U_{фп}(V)$ исследованных фоторезисторов во всем диапазоне мощностей засветки

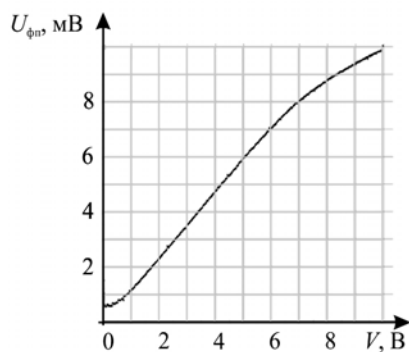


Рис. 4. Типичная зависимость $U_{фп}(V)$ при наличии засветки

указанных выше особенностей не имеет (рис. 4): увеличиваясь линейно с ростом V , с увеличением $P_φ$ она монотонно уменьшается во всем диапазоне значений напряжения смещения. Форма частотной зависимости фотопроводимости также качественно сохраняет свой вид колоколообразной зависимости во всем диапазоне исследованных значений $P_φ$, показывая при увеличении мощности фоновой засветки снижение времени релаксации фотопроводимости $τ$ от исходного значения $τ = 3 \cdot 10^{-2}$ с в несколько раз. Экспериментальное поведение фотопроводимости указывает на различие механизмов формирования сигналов фотопроводимости и шумового напряжения в фоторезисторах на основе CdSe.

Обсуждение результатов. Представленные выше результаты экспериментального исследования влияния фоновой засветки на шумовые свойства фоторезистора из CdSe не могут быть в полной мере объяснены существующими моделями формирования флуктуационных свойств полупроводников [2–4, 7]. В первую очередь это касается существования глубокого минимума шума в определенной области напряжений смещения и мощности фоновой засветки, а также зависимости параметров минимума шума от мощности засветки. В то же время поведение другого электрического параметра – фотопроводимости – вполне укладывается в рамки существующих моделей. Это обстоятельство указывает на то, что механизмы формирования фотоэлектрических свойств полупроводника CdSe и его флуктуационных свойств различны.

Однако полученные результаты по шумовым свойствам позволяют сделать некоторые предположения относительно физических процессов, участвующих в формировании этих свойств.

1. Независимость шума от направления протекания тока через фоторезистор говорит о том, что наклон энергетической диаграммы полупроводника вверх или вниз на угол, определяемый величиной приложенного электрического поля, не влияет на формирование шума. Это значит, энергетическая диаграмма фоторезистора из CdSe с омическими контактами, построенная для объяснения минимума шума, должна быть симметричной по отношению к центру полупроводника.

2. Наблюдение минимума шума в определенной области значений мощности фоновой засветки указывает на участие в его формировании неравновесных носителей заряда, среди которых наибольшие изменения концентрации испытывают неосновные носители, т.е. дырки.

3. Смещение минимума шума по оси напряжений при изменении мощности фоновой засветки свидетельствует о сходном влиянии этих параметров на механизм формирования минимума шума, что предполагает определяющую роль в рассматриваемом явлении сканирования запрещенной зоны полупроводника квазиуровнями Ферми и в первую очередь квазиуровнем Ферми для дырок.

4. Ослабление эффекта при длительном воздействии оптимальных напряжений и мощностей фоновой засветки указывает на протекание фотоструктурных преобразований, сопровождающихся исключением из процесса флуктуаций части носителей заряда в разрешенных зонах, вероятно, за счет преобразования исходных структурных комплексов в электрически неактивные комплексы.

Выводы. В результате экспериментальных исследований шумовых свойств фоторезисторов из CdSe обнаружено снижение шума, которое имеет место при определенных значениях напряжения смещения и мощности фоновой засветки. Параметры минимума зависят от мощности засветки.

Предполагается, что данный минимум вызван фотоструктурными преобразованиями в решетке полупроводника, в которых участвуют неравновесные дырки. Исходными объектами этих преобразований, вероятно, являются метастабильные комплексы структурных дефектов решетки полупроводника, которые способны захватывать неравновесные носители заряда и удерживать их в процессе засветки. Результатом этих преобразований являются другие структурные комплексы, которые не обладают электрической активностью, а значит, не участвуют в зарядовом обмене с зонами разрешенных значений энергии.

Литература

1. Георгобиани А.Н. Физика соединений АПВVI / А.Н. Георгобиани, М.К. Шейкман. – М.: Наука, 1986. – 320 с.
2. Давыдов В.Н. Взрывной шум в ненакаливаемых тонкопленочных катодах металл–диэлектрик–металл / В.Н. Давыдов, М.Б. Хаскельберг // Известия вузов. Физика. – 1992. – № 11. – С. 89–94.
3. Давыдов В.Н. Флуктуационные процессы в приповерхностной области антимонида индия / В.Н. Давыдов, Ф.С. Ким, А.С. Петров // Известия вузов. Физика. – 1988. – № 9. – С. 60–65.
4. Дьяконова Н.В. Природа объемного шума $1/f$ в GaAs и Si / Н.В. Дьяконова, М.Е. Левинштейн, С.Л. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 1991. – Т. 25, № 12. – С. 2065–2104.
5. Давыдов В.Н. Фотоиндуцированное усиление шума в полупроводниковых структурах. // Известия вузов. Физика. – 1999. – № 5. – С. 49–58.
6. Беляев С.В. Автоматизированный комплекс на базе микрочипа ADuC812 для измерения электрических параметров полупроводников / С.В. Беляев, В.Н. Давыдов, А.Ю. Масюков // Доклады ТУСУРа. – 2005. – №3. – С. 5–11.
7. Ван дер Зил А. Шумы. Источники, описание, измерение / пер. с англ.; под ред. А.К. Нарышкина. – М.: Сов. радио, 1973. – 225 с.

Давыдов Валерий Николаевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. электронных приборов ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-35-07

Эл. почта: priem@main.tusur.ru

Мусина Ирина Максимовна

Магистр каф. электронных приборов ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-35-07

Гребенников Александр Сергеевич

Студент 4-го курса каф. электронных приборов ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-35-07

Davydov V.N., Musina I.M., Grebennikov A.S.

Influence of the background noise on electrical properties of CdSe photo-resistors

As a result of research of noise properties of CdSe photo-resistors, it was discovered that when the background noise is of certain capacity, the minimum of noise appears depending on spectral density of noise voltage and bias voltage. Dependences of the parameters of obtained noise minimum on background noise capacity are investigated. It is assumed that the possible reason of its occurrence is photostructural transformations in the semiconductor due to capture of nonequilibrium holes.

Keywords: cadmium selenide, background noise, noise minimum, generation-recombination noise, flicker-noise, position density tails.
