

06

Инжекционный фотодиод на основе p -CdTe

© Ш.А. Мирсагатов, А.К. Утениязов

Физико-технический институт АН Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

E-mail: mirsagatov@rambler.ru

Каракалпакский государственный университет им. Бердаха, Республика

Каракалпакстан

E-mail: abat-62@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 июля 2011 г.

На основе фоточувствительных крупноблочных пленок теллурида кадмия p -типа с удельным сопротивлением $\rho \approx 10^6 - 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ создана Al- p -CdTe-Mo-структура с барьером Шоттки, которая обладает свойствами инжекционного фотодиода. При пропускном направлении тока (когда „+“ приложен к молибденовому контакту) и высоких уровнях освещенности она имеет токовую чувствительность $S_\lambda \approx 2.6 \text{ A/W}$ при $\lambda = 0.625 \mu\text{m}$, которая в 5 раз превышает спектральную чувствительность идеального фотоприемника при этой длине волны излучения.

Существенным недостатком фотодиодов является низкая токовая фоточувствительность, так как в них квантовый выход не может быть выше единицы. Их использование в режиме лавинного умножения приводит к очень жестким требованиям к стабильности температуры и напряжения питания. Этих недостатков лишены инжекционные фотодиоды — новый класс фотоприемников с внутренним усилением. В инжекционных фотодиодах p - n -переход или другой потенциальный барьер (например, барьер Шоттки), способный инжектировать неосновные носители, изготавливается из высокоомных полупроводников с большой длиной диффузионного смещения, причем толщина базовой области (расстояние от инжектирующего до второго контакта) в несколько раз больше длины диффузионного смещения — „длинные диоды“ [1]. Инжекционный фотодиод работает в режиме высоких уровней инжекции; проводимость базовой области определяется инжектированными носителями. Инжекционные фотодиоды созданы и исследованы на многих полупроводниках (легированные германий и кремний, арсенид

галлия, антимонид индия, твердые растворы соединений A^3B^5 и другие материалы) [2]. Однако в литературе отсутствуют сведения о создании инжекционных фотодиодов на основе соединений A^2B^6 , в частности на основе теллурида кадмия. Соединения A^2B^6 обладает удачным сочетанием электрических и фотоэлектрических свойств, высокой фоточувствительностью, способностью к электролюминесценции, высокой термо- и радиационной стойкостью. Эти материалы имеют ширину запрещенной зоны, соответствующую полному спектру видимого и частично ультрафиолетового света, для них характерны прямые оптические переходы, что позволяет получать высокую эффективность генерации электронно-дырочных пар. Поэтому на основе теллурида кадмия ведутся интенсивные исследования по созданию солнечных элементов [3]. Кроме того, представляет большой интерес создание фотоприемников с внутренним усилением на их основе. Отсутствие инжекционных фотоприемников на основе соединений A^2B^6 , вероятно, обусловлено трудностью получения p -типа проводимости во всех таких полупроводниковых материалах, кроме теллурида кадмия, и малым значением длины диффузионного смещения неосновных носителей.

Инжекционный фотодиод был создан путем напыления алюминия в вакууме $\sim 10^{-5}$ Торр с толщиной $\sim 400\text{--}500 \text{ \AA}$ на поверхность высокоомных крупноблочных пленок теллурида кадмия p -типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho \approx 10^6\text{--}10^7 \Omega \cdot \text{cm}$, с толщиной $\sim 50 \mu\text{m}$. Компенсированные крупноблочные поликристаллические $p\text{-CdTe}$ -пленки, выращенные методом сублимации в потоке водорода, имели столбчатую структуру зерен (кристаллиты), которые пронизывают всю их толщину. Преимуществом таких поликристаллических пленок является то, что они в направлении своего роста обладают свойствами монокристаллов, а в горизонтальном направлении — свойствами поликристаллов. Границы зерен служат стоками для дефектов различного рода, что приводит к увеличению времени жизни носителей заряда в кристаллах. Тыловой контакт изготовлялся из молибдена. Таким образом, созданная Al-p-CdTe-Mo -структура с барьером Шоттки обладает выпрямляющими свойствами, причем коэффициент выпрямления, определяемый как отношение прямого и обратного тока при фиксированном напряжении ($V = 5 \text{ V}$) составляет более четырех порядков (рис. 1). Прямым направлением тока в структуре считалось то, когда к Мо-контакту подавался „+“ и обратным „-“ полярности напряжения смещения. На первом участке ВАХ зависимость тока от напряжения описывается закономерностью термоэлектронной эмиссии,

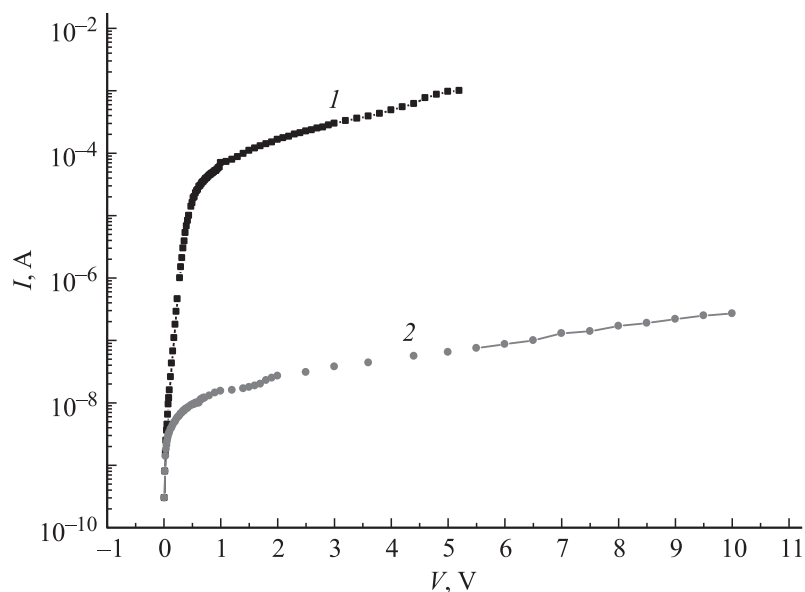


Рис. 1. Прямая (1) и обратная (2) ветви ВАХ диода с барьером Шоттки (Al–*p*-CdTe–Mo) при комнатной температуре.

так как показатель экспоненты, $c_1 \approx 1.03$, почти равен единице. Высота потенциального барьера, определенная вольт-фарадными [4,5] и фотоэлектрическими [4] методами, имеет практически одинаковое значение, равное ~ 1.4 eV, что хорошо согласуется с ее расчетным значением, проведенным при условии отсутствия поверхностных состояний между металлом и полупроводником CdTe *p*-типа с учетом понижения барьера на $\Delta(q\phi)$ за счет эффекта Шоттки [4]. Здесь, вероятно, играет важную роль тонкий окисный слой алюминия (Al_2O_3) [6], который образуется в процессе напыления Al на поверхность пленки *p*-CdTe. Известно [6], что окисные слои типа SiO_2 и Al_2O_3 обладают ионными связями и практически на их поверхности не образуются поверхностные состояния, в силу чего они эффективно пассивируют поверхностные состояния полупроводников с ковалентной связью.

Проведенный анализ прямой ветви темновой ВАХ Al–*p*-CdTe–Mo-структуры (рис. 2, 3 и 4 участки) [7] показывает, что база струк-

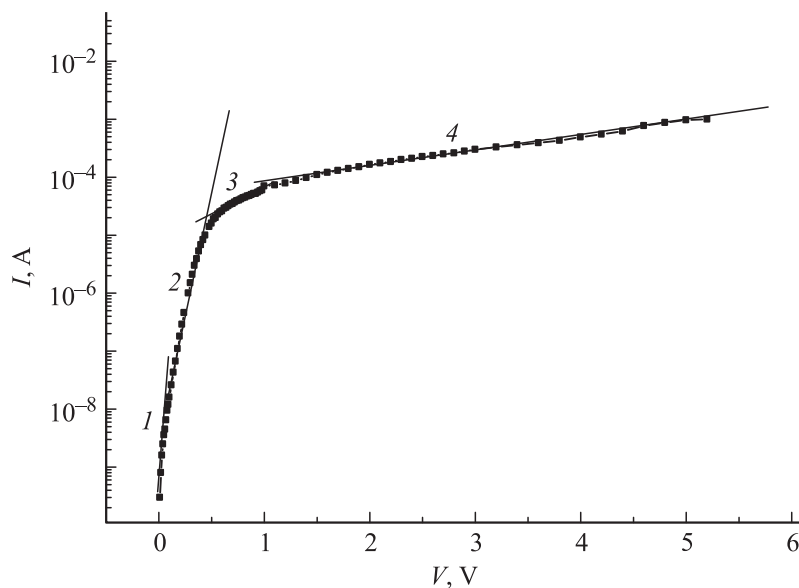


Рис. 2. Прямая ветвь ВАХ типичного диода с барьером Шоттки (Al- p -CdTe-Mo) в полулогарифмическом масштабе в темноте при $T = 300$ K, $I = I_0[\exp(qV/ckT) - 1]$; 1 — $c = 1.03$ и $I_0 = 4 \cdot 10^{-10}$ A; 2 — $c = 1.86$ и $I_0 = 1.1 \cdot 10^{-9}$ A; 3 — $c = 14.8$ и $I_0 = 6 \cdot 10^{-6}$ A; 4 — $c = 60$ и $I_0 = 4.1 \cdot 10^{-5}$ A.

туры высокоомная и отношение толщины базы к длине диффузии неосновных носителей заряда составляет $\sim 3.5-5$ при толщине базы (p -CdTe) $\sim 50 \mu\text{m}$, что соответствует длине диффузии неосновных носителей электронов $14-10 \mu\text{m}$. Это в десятки раз превышает литературные данные [8]. Кроме этого, исследуемая структура фоточувствительна. Таким образом, установлено, что Al- p -CdTe-Mo-структура отвечает требованиям, предъявляемым к инжекционным фотодиодам [1]. Поэтому была исследована ВАХ данной структуры под действием лазерного облучения с $\lambda = 0.625 \mu\text{m}$ и мощностью 83 mW/cm^2 (рис. 3). Как видно из рис. 3, световая ВАХ резко отличается от темновой ВАХ как в прямом, так в обратном направлениях тока. Фототок (I_{ph}) по величине намного превышает темновой ток (I_d) при одном и том же напряжении смещения. Например, I_{ph} в 15–20 раз больше,

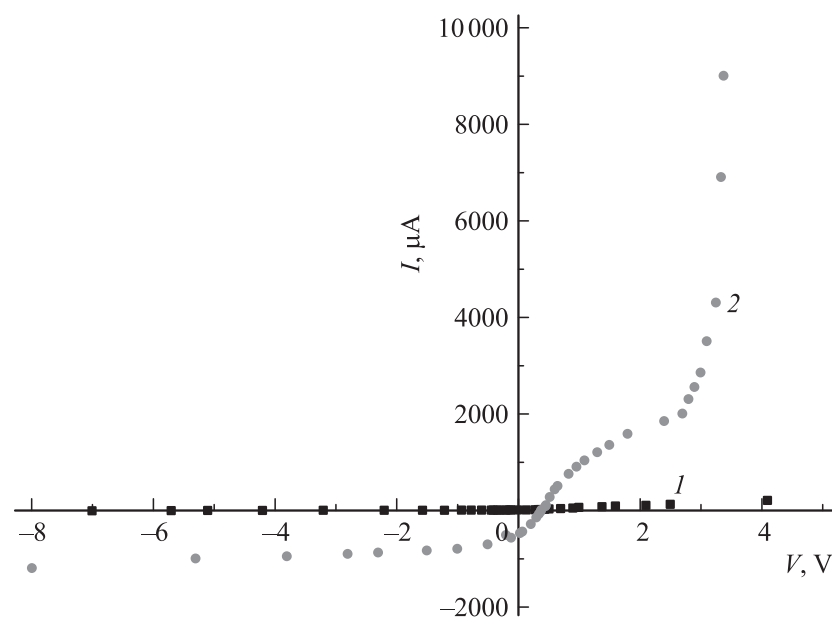


Рис. 3. Темновая (1) и световая (2) ВАХ диода Шоттки (Al-p-CdTe-Mo) при комнатной температуре при облучении лазером мощностью 83 mW/cm^2 .

чем I_d при $V = 2 \text{ V}$ и в 100 раз больше при $V \approx 3.3 \text{ V}$ в прямом направлении тока. В обратном направлении тока фототок при $V \approx 0.5 \text{ V}$ практически выходит на насыщение; и при этом отношение I_{ph} к I_d составляет не менее 10. После этого дальнейшее возрастание обратного смещения приводит к медленному увеличению I_{ph} , особенно это заметно начиная с $V \approx 2 \text{ V}$. С целью выяснения эффективности исследуемой структуры в качестве фотодиода был произведен расчет фототока. При облучении лазерными лучами с $\lambda = 0.625 \mu\text{m}$ и мощностью 83 mW/cm^2 на поверхность структуры падает количество квантов $Q_0 = 2.6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ с энергией $E \approx 1.984 \text{ eV} \approx 2 \text{ eV}$. А количество квантов в базе (p-CdTe)-структуры, вычисленное по формуле $Q = Q_0 S(1 - R)$, составляет $\sim 9 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ при значениях: $S \approx 7 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$ (площадь структуры), $R \approx 0.4$ — доля отраженных квантов с $E \approx 2 \text{ eV}$ от алюминиевой прослойки согласно проведенным

измерениям коэффициента отражения. Теперь допустим, что все кванты, попавшие в базу, поглощаются, причем все они образуют электронно-дырочные пары, которые разделяются барьером без потерь. В таком случае генерированный фототок $I_{ph} = qQ = 1.44 \cdot 10^{-3}$ А. В то же время в эксперименте $I_{ph} \approx 9 \cdot 10^{-3}$ А при $V = 3.3$ В, что более чем в 6 раз превышает гипотетическое расчетное значение. Отсюда следует, что в данной структуре происходит усиление фототока. Наглядным подтверждением тому является тот факт, что токовая чувствительность такой структуры составляет ≈ 2.6 А/Вт, тогда как идеальный фотоприемник этой длины волны имеет токовую чувствительность 0.5 А/Вт [9], т. е. более чем в пять раз меньше. Под идеальным фотоэлектрическим прибором понимается тот, у которого отсутствует отражение от поверхности, внутренний квантовый выход ≈ 1 и все генерированные носители участвуют в формировании фототока.

Возрастание концентрации неравновесных электронов за счет фотогенерации создает дополнительный градиент неосновных носителей в толще слоя p -CdTe, что обуславливает увеличение диффузионного тока. Это приводит к модуляции сопротивления базовой области. Поскольку барьер Шоттки включен последовательно с сопротивлением базы, то изменение последнего приводит к изменению напряжения на барьере Шоттки Al- p -CdTe и изменению эмиссионного тока. Последнее обстоятельство вызывает новое изменение проводимости базы, новое перераспределение напряжения и новое усиление эмиссии электронов из металла (Al) в полупроводник (p -CdTe). Таким образом, обеспечивается значительное усиление первоначального фототока. Одним словом, рассмотренный фотодиод является разновидностью инжекционного фотодиода [1]. Проявление свойств инжекционного фотодиода Al- p -CdTe-Mo-структурой подтверждается тем, что в базе (p -CdTe) длина диффузии неосновных носителей тока имеет достаточно высокое значение (~ 10 – 14 мкм), что в десятки раз больше значений, приведенных в других работах. А с другой стороны, в данной структуре токовая чувствительность намного меньше, чем у инжекционных фотодиодов, созданных на других материалах [2]. Это, вероятно, обусловлено тем, что исследуемая структура еще не оптимизирована и влияние тылового контакта (Mo) на токоперенос не установлено. Проведенный рентгенофазный анализ показывает, что на тыловом контакте образуется окисный слой типа MoO₃, в результате чего на тыловом контакте также формируется МОП-структура типа Mo-MoO₃- p -CdTe [10].

Список литературы

- [1] Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Сов. радио, 1980. С. 164–176.
- [2] Викулин И.М., Курмашев Ш.Д., Стафеев В.И. // ФТП. 2008. Т. 42. В. 1. С. 113–127.
- [3] Pugh J.R., Mao D., Zhang J., Heben M.J., Nelson A.J., Frank A.J. // J. Appl. Phys. 2009. V. 74. N 4. P. 2619–2625.
- [4] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М.: Мир. 1984. С. 282–270. (Sze S.M. Physics of semiconductor devices. NY: A Willey Inerscience Publication, 1981).
- [5] Георгиу В.Г. Вольт-фарадные измерения параметров полупроводников. Кишинев: Штиинца, 1987. С. 64.
- [6] Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл–полупроводник. М.: Мир, 1975. С. 149. (Milnes A.G., Feucht D.L. Heterojunctions and metal–semiconductors. N.Y., London: Acad. Press, 1972).
- [7] Стафеев В.И. // ЖТФ. 1958. Т. 28. В. 8. С. 1631–1639.
- [8] Zanio K. // Semiconductors and Semimetals. N 13. N.Y.: Acad. Press, 1978. P. 210.
- [9] Амброзьяк А. Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов. М.: Сов. радио, 1970. С. 167–170. (Ambroziak A. Konstrukcja i technologia przyrzadow fotoelektrycznych. Warszawa, 1967).
- [10] Мирсагатов Ш.А., Музафарова С.А., Баиев М.С., Ачилов А.С. // Узбекский физический журнал. 2009. В. 3. С. 154–160.