

УДК 535-15; 535.215.5; 621.315.592.9

PACS: 61.82.Fk; 78.30.-j; 71.20.Nr

Оптоэлектронные свойства пленок InSb при обнаружении плазменного резонанса в длинноволновом инфракрасном диапазоне

М. И. Шишкин, Ю. В. Никулин, М. В. Ветринцев, А. Г. Роках

В работе исследуется влияние широкополосного длинноволнового инфракрасного (ИК) излучения на электрические свойства пленок InSb, термически напыленных на монокристалл CdS и пластину галлий гадолиниевого граната (ГГГ). Обнаружено поглощение в пленке как совпадающее с исходным порошком InSb, так и более коротковолновое, связанное с резонансным поглощением свободными электронами в образовавшейся пленке. На основании моделирования зонной диаграммы гетероперехода n^+ -InSb – n -CdS и его электрических свойств предложено объяснение смены поглощения на отражение в пленках InSb формированием обогащенного электронами слоя в CdS, экранирующего ИК-излучение. Отмечена линейность вольт-амперных характеристик (ВАХ) и их чувствительность к длинноволновому ИК-излучению (уменьшение проводимости), связанная с образованием на поверхности металлической пленки.

Ключевые слова: длинноволновый инфракрасный диапазон, антимонид индия, сульфид кадмия, гетеропереход, плазменный резонанс, фотопроводимость, Comsol Multiphysics.

Ссылка: Шишкин М. И., Никулин Ю. В., Ветринцев М. В., Роках А. Г. // Прикладная физика. 2020. № 2. С. 39.

Reference: M. I. Shishkin, Yu. V. Nikulin, M. V. Vetrintsev, and A. G. Rokakh, Applied Physics, No. 2, 39 (2020).

Введение

Одной из задач оптоэлектроники является разработка системы эффективной регистрации энергии ИК-излучения слабо нагретых тел без глубокого охлаждения детекторов. Современный подход заключается в увеличении поглощаемой энергии за счет использования плазменных эффектов, когда энергия концентрируется вблизи металлических нано-

частиц (локальный плазмонный резонанс) [1]. Чтобы расширить этот эффект на средний ИК-диапазон используют нанесение массивов металлических дисков или решеток с размерами меньше длины волны в комбинации с чувствительными к ИК-излучению материалами, например, графеном [2], квантовыми точками бесщелевых полупроводников [3] или оксидом ванадия [4]. Часто общим в таких случаях является то, что слои для концентрации излучения, передачи его энергии электронам и последующего переноса их по электрической цепи пространственно разделены. Фактически используется принцип болометра, а не классических полупроводниковых детекторов излучения, в которых поглощение излучения приводит непосредственно к генерации электрического сигнала в виде образования свободных носителей заряда при переходах зона-зона. Тем не менее, возможность передачи энергии плазмонов непосредственно в электрическую цепь уже представлена в гранули-

Шишкин Михаил Игоревич, старший преподаватель, к.ф.-м.н.

Никулин Юрий Васильевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

Ветринцев Максим Викторович, студент.

Роках Александр Григорьевич, профессор, д.ф.-м.н.

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского.

Россия, 410012, г. Саратов, Астраханская, 83.

E-mail: shishkin1mikhail@gmail.com

Статья поступила в редакцию 3 марта 2020 г.

© Шишкин М. И., Никулин Ю. В., Ветринцев М. В., Роках А. Г., 2020

рованных металлических пленках [5], на структурах металл–полупроводник–металл [6], о возможности преобразования плазменного резонанса в фотопроводящем композите CdS-PbS сообщалось авторами данной работы [7].

Последнее неслучайно, ведь именно полупроводниковые гетероструктуры, изначально предназначенные для фотодетектирования и фотовольтаики на сегодняшний день представляют значительный интерес для плазмоники ввиду широких возможностей управления концентрацией носителей заряда, как в самом гетеропереходе, так и в образующих его полупроводниковых слоях или наночастицах благодаря особенностям их получения. Следует заметить, что на наноуровне исследователи продолжают придерживаться традиционного подхода к получению таких структур. Например, плазмонные структуры, содержащие полупроводники группы A^3B^5 , обычно получают молекулярно-лучевой эпитаксией [8], в то время как структуры на основе менее требовательных к методу получения полупроводников A^2B^6 и Cu_xS , изготавливают химическим осаждением [9] или коллоидным синтезом [10]. Особое внимание среди всех полупроводников A^3B^5 заслуживает InSb, имеющий отличные возможности для плазмоники ввиду самой высокой среди полупроводников подвижности электронов и подходящий для формирования на его основе фотодетекторов широкого диапазона гибридными методами [11]. Необходимо отметить, что наночастицы InSb вполне успешно получают коллоидным синтезом в оболочке из CdS и ZnS [12], а поликристаллические пленки с высокой подвижностью электронов – термическим напылением [13], причем процесс получения оказывается значительно менее вредным и трудоемким, чем, например, GaAs и InAs.

В связи с этим, на наш взгляд, представляет интерес изучение взаимодействия полученных относительно простыми методами пленок на основе сравнительно больших квантоворазмерных частиц InSb, плазмонные свойства которых будут хорошо описываться гидродинамической моделью Друде [14], с монокристаллами и пленками A^2B^6 . Это взаимодействие может приводить к появлению оптических эффектов в InSb, обусловленных

«диэлектрическим усилением» [15] из-за различия диэлектрических проницаемостей InSb (в области спектра, соответствующей плазменному резонансу) и широкозонного полупроводника A^2B^6 .

Целью данной работы является получение и исследование свойств структуры «сильно легированная пленка узкозонного полупроводника – широкозонный фотопроводник» для изучения возможности фотоэлектрической регистрации излучения среднего и длинноволнового ИК-диапазона. Для достижения данной цели опробована методика напыления поликристаллических пленок InSb на монокристалл CdS и проведено сравнение их с пленками, напыленными на диэлектрическую подложку ГГГ. Изучено влияние ИК-излучения на полученные пленки в вакууме, позволяющем избежать поглощения излучения в соответствующем спектральном диапазоне атмосферой.

Исследуемые образцы и измерительная аппаратура

Образцы пленок InSb получали термическим испарением в соответствии с технологией, описанной в [13], на пластине ГГГ и на монокристалле CdS, обладающим прозрачностью до 17 мкм и не имеющем полос остаточных лучей до 30 мкм. Сопротивление монокристалла при освещении галогеновой лампой мощностью 60 Вт уменьшалось примерно в 100 раз по сравнению с темновым, которое варьировалось в диапазоне 10^6 – 10^7 Ом см. В качестве материала для распыления использовался растолченный в порошок монокристалл InSb *n*-типа с концентрацией электронов 5×10^{23} м⁻³. Измеренные методом Ван-дер-Пау при одинаковой толщине пленок 550 нм удельное сопротивление и концентрация электронов для пленок на подложке ГГГ после отжига при 550 °С в течение 1 мин составили $8,2 \times 10^{-6}$ (Ом м) и $1,5 \times 10^{24}$ м⁻³, а для пленок на CdS – 6×10^{-5} (Ом м) и $5,2 \times 10^{24}$ м⁻³ соответственно. Низкое сопротивление позволило использовать прижимной контакт зондов непосредственно к пленкам для измерения ВАХ.

Для измерения оптических спектров зеркального отражения использовался Фурье спектрофотометр Nicolet 6700 с соответст-

вующими приставками. Для исследования влияния ИК-излучения, находящегося за краем собственного поглощения и скорее соответствующего поглощению свободных электронов, на электрические свойства образца, а именно на ВАХ, собиралась оптическая схема, представленная на рис. 1. Источник излучения, в качестве которого выступал глобар, сферическим зеркальным объективом 1 и плоскими зеркала 2 и 3 проецировался на зеркало 4 и далее свет с помощью сферического зеркального объектива 7 и плоских зеркал 5 и 6 попадал на образец. Все зеркала являлись стандартными алюминиевыми, кроме зеркала 4, в качестве которого выступала отполированная пластина монокристалла InAs, спектр отражения которой представлен во врезке к рис. 1.

скими зеркалами 2 и 3 проецировался на зеркало 4 и далее свет с помощью сферического зеркального объектива 7 и плоских зеркал 5 и 6 попадал на образец. Все зеркала являлись стандартными алюминиевыми, кроме зеркала 4, в качестве которого выступала отполированная пластина монокристалла InAs, спектр отражения которой представлен во врезке к рис. 1.

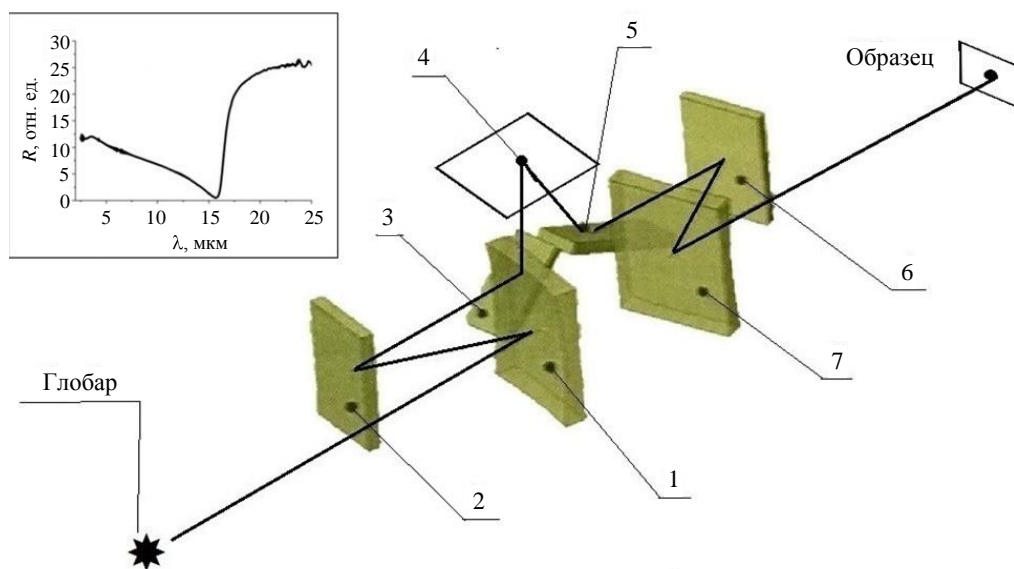


Рис. 1. Оптическая схема для получения и фокусировки длинноволнового ИК-излучения. Во врезке представлен спектр отражения пластины InAs (обозначенной цифрой 4 на схеме).

Как видно из рис. 1, пластина достаточно хорошо отражала длинноволновое ИК-излучение, а сравнительно коротковолновое излучение до 3 мкм, способное возбудить собственную фотопроводимость в пленке InSb, было не существенно из-за собственного поглощения монокристалла InAs. Вся система располагалась в светозащитном кожухе. В роли эталонного фотоприемника, позволявшего настроить максимальную интенсивность излучения выступал неселективный термоэлектрический детектор LP PIRG 01, предназначенный для метеорологических измерений. К преимуществам такого детектора относилась возможность проводить измерения на постоянном токе, (т. е. не требовалось специальной модуляции света) и наличие специального кремниевого окна диаметром 50 мм, отрезавшего все излучение короче 5 мкм. Для устранения поглощения длинноволнового излучения атмосферой оптическая схема с детектором и глобаром монтировалась внутри

рабочего объема вакуумного универсального поста ВУП-7. Измерение ВАХ проводилось вручную, электрические контакты выводились из вакуумной камеры через специальные отверстия. Остаточное давление в камере поддерживалось вблизи $\sim 8 \times 10^{-4}$ Па, температура внутри камеры в процессе измерения составляла 22 °С.

Экспериментальные результаты

На рис. 2. представлены спектр отражения исходного монокристалла InSb, спектр отражения пленки InSb на CdS и спектр разности значений коэффициентов отражения для пленки InSb на подложке ГГГ и самой подложки ГГГ ($\Delta R = R_{\text{InSb}} - R_{\text{ГГГ}}$). Форма представления последнего спектра была обусловлена сложной формой дисперсии коэффициента отражения $R_{\text{ГГГ}}$, при этом отрицательные участки графика (14–17 мкм и 20–25 мкм),

очевидно, связаны с поглощением непосредственно в пленке. Из рис. 2 видно, что для пленок InSb на ГГГ (кривая 2) по сравнению с монокристаллом InSb (кривая 1) появился дополнительный минимум в диапазоне 14–17 мкм; в то же время для пленок InSb на CdS излучение после 15 мкм начинает резко расти (кривая 3). В совокупности это напоминает спектр отражения, характерный для плазменного резонанса в монокристаллах, например, для того же монокристалла InSb (кривая 1), где плазменный резонанс наблюдался в области длин волн более 22 мкм. Таким образом, для сравнительно тонких (толщиной ~ 500 нм, как указывалось ранее) поликристаллических пленок нанесение их на подложку фотопроводящего полупроводника CdS делает вероятным наблюдение плазменного резонанса в длинноволновом ИК-диапазоне.

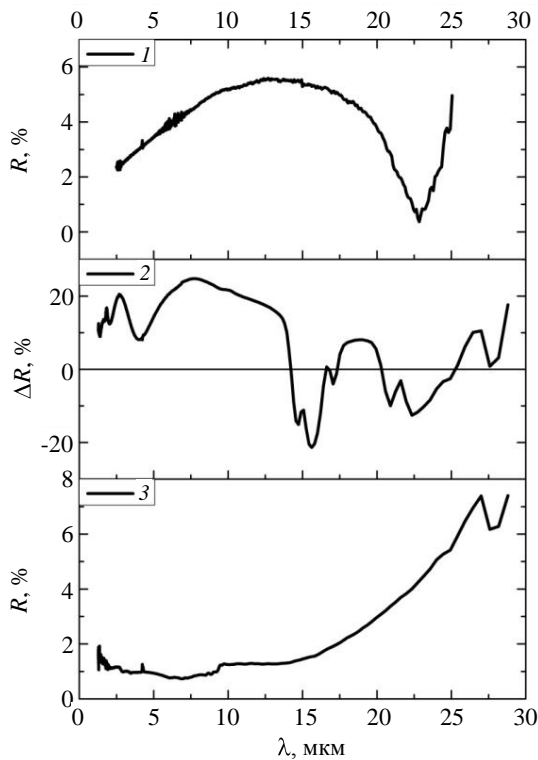


Рис. 2. Спектр отражения монокристалла InSb (1); спектр разности значений ΔR коэффициентов отражения для пленки InSb на подложке ГГГ и самой подложки ГГГ (линия $\Delta R = 0$ обозначена для того чтобы показать, излучение каких длин волн пленка поглощает) (2); спектр отражения пленки InSb на CdS (3).

Последнее позволяет излучению длин волн более 15 мкм, отраженному от монокристалла InAs (рис. 1), воздействовать на сво-

бодные электроны в пленках InSb. Аналогично исследованиям, посвященным изучению преобразования энергии плазмонов в фототок в структурах на основе барьеров Шоттки [16], в нашем случае, чтобы преобразовать поглощенное излучение в электрический сигнал, необходимо было обеспечить переход свободных электронов с более высокой энергией из низкоомного InSb в высокоомный монокристалл CdS. Это привело бы к уменьшению проводимости пленки узкозонного материала и увеличению проводимости подложки. На похожем эффекте основано действие преобразователя ИК-излучения, когда контакт высоколегированного узкозонного и широкозонного полупроводников используется для генерации излучением электронно-дырочных пар в узкозонном полупроводнике и последующей инжекции электронов в широкозонный.

На рис. 3 показаны ВАХ пленок InSb на ГГГ, а также на CdS в темноте и при освещении (излучение было перпендикулярно плоскости протекания токов). Обращает на себя внимание линейность ВАХ пленки InSb на CdS в темноте, которая практически сохраняется и при освещении, хотя при этом токи в пленке уменьшаются. Линейность ВАХ говорит об омичности прижимных контактов к пленке, что вероятно обусловлено присутствием избытка металлической компоненты, связанной с индием, на поверхности пленки. Уменьшение значений токов при освещении может свидетельствовать о разогреве образца и в частности металлической пленки, поглощающимся в InSb излучением.

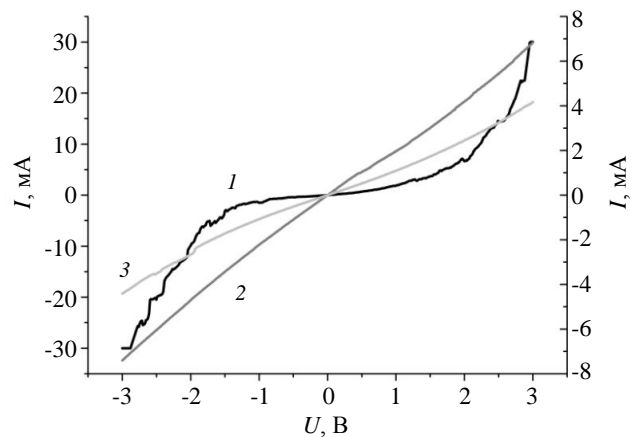


Рис. 3. ВАХ пленок InSb на ГГГ (1) – левая шкала токов; на CdS в темноте (2) и при освещении ИК-

излучением (3) – правая шкала токов.

Стоит отметить, что такие пленки будут иметь не только активную, но и реактивную (емкостную) составляющую импеданса, способную влиять, к примеру, на гистерезис ВАХ. Ранее на слоях, составленных из осажденных электрофорезом порошков полупроводников A^3B^5 с концентрацией носителей заряда $10^{24}–10^{25} \text{ м}^{-3}$, было показано, что на частотах 200–300 кГц в таких слоях наблюдался максимум емкости, величина которого определялась концентрацией носителей заряда [17]. В таком случае подсветка излучением 15–25 мкм, соответствующему области плазменного отражения в указанных образцах, ввиду возникновения коллективных колебаний электронов, могла бы вызвать изменения максимума емкости в указанном диапазоне частот в ту или иную сторону. Впоследствии нам удалось установить влияние длинноволнового излучения на перенос носителей между частицами для порошкового слоя PbS [18].

Для понимания функционирования структуры InSb на CdS в поперечном режиме (когда направление излучения совпадает с направлением протекания токов) ввиду малого количества информации по гетеропереходам InSb–CdS, как и в целом по их твердым растворам [19], применялось моделирование изотипного гетероперехода $n\text{-InSb}-n\text{-CdS}$. Для решения данной задачи был выбран модуль Semiconductors в составе программного пакета Comsol Multiphysics, позволяющий моделировать как изотипные, так и анизотипные гетеропереходы. Необходимо отметить, что при моделировании не учитывалось невысокое качество нашего гетероперехода из-за недостаточной изученности совместимости постоянных решеток двух полупроводников, а также индивидуальных особенностей термического напыления пленок на полупроводниковые монокристаллы.

На рис. 4 представлены ВАХ структуры при прямом и обратном смещении и продемонстрирован энергетический барьер для электронов на границе гетероперехода. За счет того, что в отсутствие смещения зона проводимости в CdS изгибается вниз, в области пространственного заряда (приходящегося преимущественно на CdS) формируется область обогащенная электронами. При этом эффективная толщина слоя с высокой концен-

трацией свободных электронов увеличивается почти в два раза, что может приводить к изменению отражения излучения в ИК-области за счет экранирования свободными носителями. По аналогии с металлами, у которых сплошная пленка отражает свет, а наночастицы и гранулированные пленки его селективно поглощают [5], поликристаллическая пленка InSb может, как поглощать свет, так и проявлять зеркальные свойства по отношению к излучению соответствующего спектрального диапазона в структуре гетероперехода с обогащенным электронами слоем (рис. 2). При этом, как представляется нам, при обратном смещении, когда обогащенный электронами слой в монокристалле CdS исчезает и последний ведет себя подобно диэлектрику, излучение вновь начинает поглощаться в пленке. Кроме того, освещение видимого и ближнего ИК-диапазона, которое вызывает формирование дополнительных свободных носителей в монокристалле CdS, может также влиять на отражение в длинноволновой ИК-области. Это свидетельствует о потенциальных возможностях управления поглощением ИК-излучения в гетероструктуре InSb–CdS.

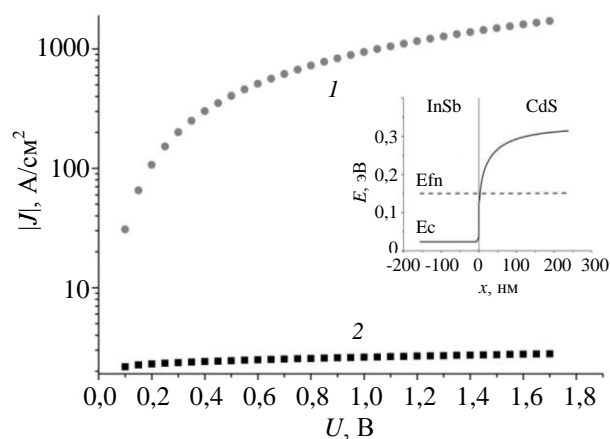


Рис. 4. Смоделированные ВАХ структуры $n\text{-InSb}-n\text{-CdS}$ при (1) отрицательном и (2) положительном напряжении на InSb. На оси ординат представлено абсолютное значение плотности тока. Во врезке показан энергетический барьер, образованный изгибом зоны проводимости в CdS.

Заключение

Исследовано влияние длинноволнового ИК-излучения на электрические свойства пленок InSb, полученных термическим испарением на монокристалле CdS и пластине ГТГ.

На спектрах отражения в ИК-области обнаружено поглощение в пленке, совпадающее с исходным порошком InSb, а также более коротковолновое, обусловленное поглощением свободными электронами в образовавшейся пленке. Предложено объяснение смены поглощения на отражение в пленках InSb формированием обогащенного электронами слоя в CdS, экранирующего ИК-излучение. Таким образом, структура может проявлять электрооптические свойства в ИК-диапазоне, управляемые полярностью приложенного напряжения. Предполагается, что дальнейшее совершенствование технологии получения плазменно-резонансных и фотопроводящих слоев в составе изотипных и анизотипных гетеропереходов позволит создать преобразователи длинноволнового ИК-излучения, в основе действия которых будет коллективное возбуждение свободных электронов.

Работа поддержана грантом РФФИ
№ 18-37-00085 мол_а

ЛИТЕРАТУРА

1. Tong J., Suo F., Ma J., Tobing L. Y. M., Li Q., Zhang D. H. // *Opto-Electronics Advances*. 2019. Vol. 2. No. 1. P. 180026.
2. Safaei A., Chandra S., Shabbir M. W., Leuenberger M. N., Chanda D. // *Nat. Comm.* 2019. Vol. 10. P. 3498.
3. Tang X., Ackerman M. M., Guyot-Sionnest Ph. // *Am. Chem. Soc.* 2018. Vol. 10. P. 1021.
4. Li Q., Yu B., Li Zh., Wang X., Zhang Z., Pan L. // *Chin. Phys. B*. 2017. Vol. 26. No. 8. P. 085202.
5. Vartanyan T. A., Vashchenko E. V., Leonov N. B., Przhibel'skii S. G., Khromov V. V. // *JETP*. 2009. Vol. 109. No. 1. P. 140.
6. Tong J., Zhou W., Qu Y., Xu Zh., Huang Zh., Zhang D. H. // *Nat. Comm.* 2017. Vol. 8. P. 1660.
7. Шишкин М. И., Вениз С. Б., Роках А. Г. / Труды XXIV Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва. 2016). С. 129–132.
8. Milla M. J., Barho F., Gonzalez-Posada F., Cerutti L., Bomers M., Rodriguez J.-B., Tournie E., Taliercio T. // *Nanotechnology*. 2016. Vol. 27. No. 42. P. 5201.
9. Kalanur S. S., Seo H. // *RSC Advances*. 2017. Vol. 7. P. 11118.
10. Ye H., Tang A., Hou Y., Yang Ch., Teng F. // *OSA*. 2014. Vol. 4. No. 2. P. 220.
11. Xu J., Hu J., Wang R., Li Q., Li W., Guo Y., Liu F., Ullah Z., Wen L., Liu L. // *Appl. Phys. Lett.* 2017. Vol. 111. No. 5. P. 1106.
12. Liu W., Chang A. Y., Schaller R. D., Talapin D. V. // *J. Am. Chem. Soc.* 2012. Vol. 134. P. 20258.
13. Koswathage C., Okada T., Noguchi T., Taniguchi S., Yoshitome S. // *AIP Advances*. 2016. Vol. 6. P. 115303.
14. Maack J. R., Mortensen N. A., Wubs M. // *EPL*. 2017. Vol. 119. No. 1. P. 17003.
15. Keldysh L. V. // *Phys. Stat. Sol.* 1997. Vol. 164. No. 3. P. 3.
16. Sharma A., Kumar R., Bhattacharyya B., Husale S. // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. P. 22939.
17. Шишкин М. И., Ягудин И. Т., Уткин Д. М., Жуков Н. Д. / Материалы IV Всероссийского семинара «Современные проблемы биофизики, генетики, электроники и приборостроения» (Саратов. 2018). С. 100–105.
18. Шишкин М. И., Гавриков М. В., Ягудин И. Т., Роках А. Г. // *Письма в ЖТФ*. 2019. Vol. 45. No. 8. P. 3.
19. Kirovskaya I. A., Nor P. E., Filatova T. N. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. Vol. 1210. P. 1.

PACS: 61.82.Fk; 78.30.-j; 71.20.Nr;

Optoelectronic properties of InSb films manifesting plasma resonance in the long-wave infrared range

M. I. Shishkin, Yu. V. Nikulin, M. V. Vetrintsev, and A. G. Rokakh

Saratov State University
83 Astrakhanskaya st., Saratov, 410012, Russia
E-mail: shishkin1mikhail@gmail.com

Received March 5, 2020

The paper studies influence of broadband long-wave infrared (IR) radiation on the electrical properties of InSb films thermally sprayed on CdS single crystal and the plate of gallium gado-

linium garnet (GGG). Absorption in the film was found to coincide with both the initial InSb powder and the shorter wavelength range due to free electrons resonance absorption in the film. Based on the simulation of the n+-InSb-n-CdS heterojunction and its electrical properties, formation of the electron-enriched layer in CdS that screens the IR radiation has been suggested as the explanation of the substitution of the absorption for the reflection in InSb films. The linearity of the current-voltage characteristics and their sensitivity to the long-wave infrared radiation (a decrease in conductivity) associated with the formation of a metal film on the surface are noted.

Keywords: long-wave infrared range, indium antimonide, cadmium sulfide, heterojunction, plasma resonance, photoconductivity, Comsol Multiphysics.

REFERENCES

1. J. Tong, F. Suo, J. Ma, L. Y. M. Tobing, Q. Li, and D. H. Zhang, *Opto-Electronics Advances* **2**, 180026 (2019).
2. A. Safaei, S. Chandra, M. W. Shabbir, M. N. Leuenberger, and D. Chanda, *Nat. Comm.* **10**, 3498 (2019).
3. X. Tang, M. M. Ackerman, and Ph. Guyot-Sionnest, *Am. Chem. Soc.* **10**, 1021 (2018).
4. Q. Li, B. Yu, Zh. Li, X. Wang, Z. Zhang, and L. Pan, *Chin. Phys. B.* **26**, 085202 (2017).
5. T. A. Vartanyan, E. V. Vashchenko, N. B. Leonov, S. G. Przhibel'skii, and V. V. Khromov, *JETP* **109**, 140 (2009).
6. J. Tong, W. Zhou, Y. Qu, Zh. Xu, Zh. Huang, and D. H. Zhang, *Nat. Comm.* **8**, 1660 (2017).
7. M. I. Shishkin, S. B. Venig, and A. G. Rokakh, in *Proc. XXIV International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices* (Moscow, 2016), pp. 129–132.
8. M. J. Milla, F. Barho, F. Gonzalez-Posada, L. Cerutti, M. Bomers, J.-B. Rodriguez, E. Tournie, and T. Taliercio, *Nanotechnology* **27**, 5201 (2016).
9. S. S. Kalanur and H. Seo, *RSC Advances* **7**, 11118 (2017).
10. H. Ye, A. Tang, Y. Hou, Ch. Yang, and F. Teng, *OSA* **4**, 220 (2014).
11. J. Xu, J. Hu, R. Wang, Q. Li, W. Li, Y. Guo, F. Liu, Z. Ullah, L. Wen, and L. Liu, *Appl. Phys. Lett.* **111**, 1106 (2017).
12. W. Liu, A. Y. Chang, R. D. Schaller, and D. V. Talapin, *J. Am. Chem. Soc.* **134**, 20258 (2012).
13. C. Koswathage, T. Okada, T. Noguchi, S. Taniguchi, and S. Yoshitome, *AIP Advances.* **6**, 115303 (2016).
14. J. R. Maack, N. A. Mortensen, and M. Wubs, *EPL* **119**, 17003 (2017).
15. L. V. Keldysh, *Phys. Stat. Sol.* **164**, 3 (1997).
16. A. Sharma, R. Kumar, B. Bhattacharyya, and S. Husale, *Scientific Reports* **6**, 22939 (2016).
17. M. I. Shishkin, I. T. Yagudin, D. M. Utkin, and N. D. Zhukov, in *Proc. All-Russian seminar «Contemporary challenges of biophysics, genetics, electronics and device engineering»* (Saratov, 2018), pp. 100–105.
18. M. I. Shishkin, M. V. Gavrikov, I. T. Yagudin, and A. G. Rokakh, *Technical Physics Letters* **45**, 370 (2019).
19. I. A. Kirovskaya, P. E. Nor, and T. N. Filatova, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1210**, 1 (2019).