

УДК 538.975:621.315.592

СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК InSb ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1,5 МэВ

В. В. УГЛОВ¹⁾, А. К. КУЛЕШОВ¹⁾, Д. П. РУСАЛЬСКИЙ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Исследуются гетероэпитаксиальные пленки антимонида индия (InSb) на монокристаллических пластинах арсенида галлия (GaAs) толщиной 2,5–2,7 мкм, полученные методом вакуумного взрывного термического испарения. Они обладают уникальной стойкостью к сверхнизким температурам открытого космоса, определенному уровню радиационного воздействия и применяются в качестве основного элемента при создании

Образец цитирования:

Углов ВВ, Кулешов АК, Русальский ДП. Структура и электрические свойства гетероэпитаксиальных пленок InSb после воздействия протонов с энергией 1,5 МэВ. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2025; 2:60–67.
EDN: HZTCXO

For citation:

Uglov VV, Kuleshov AK, Rusalsky DP. Structure and electrical properties of InSb heteroepitaxial films after exposure to protons with energy of 1.5 MeV. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2025;2:60–67. Russian.
EDN: HZTCXO

Авторы:

Владимир Васильевич Углов – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета.

Андрей Константинович Кулешов – кандидат физико-математических наук; заведующий научно-исследовательской лабораторией физики ионно-плазменной модификации твердых тел кафедры физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета.

Дмитрий Петрович Русальский – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физики ионно-плазменной модификации твердых тел кафедры физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета.

Authors:

Vladimir V. Uglov, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of solid state physics and nanotechnologies, faculty of physics.

uglov@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0003-1929-4996>

Andrej K. Kuleshov, PhD (physics and mathematics); head of the laboratory of physics of ion-plasma modification of solids, department of solid state physics and nanotechnologies, faculty of physics.

kuleshak@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0002-1181-7361>

Dmitry P. Rusalsky, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of physics of ion-plasma modification of solids, department of solid state physics and nanotechnologies, faculty of physics.

rusalsky@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0003-1638-0899>

различных микроэлектронных устройств. С использованием метода рентгеновской дифрактометрии изучаются изменения структуры и электрических свойств (в том числе в магнитном поле) гетероэпитаксиальных пленок InSb(100) на подложках GaAs(100) после воздействия протонов с энергией 1,5 МэВ и флюенсами $1 \cdot 10^{15}$, $5 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ H}^+$ на 1 cm^2 . Определяется, что угловое положение, интегральная интенсивность, расширение пика дифракции от InSb(100), параметр кристаллической решетки, электрические свойства пленок, механические напряжения в них не изменяются при облучении пленок протонами до флюенса $1 \cdot 10^{15} \text{ H}^+$ на 1 cm^2 . Устанавливается, что при влиянии на пленки протонов с флюенсами $5 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ H}^+$ на 1 cm^2 происходит уменьшение интегральной интенсивности пика дифракции от InSb(100). Произведенные с использованием программы *SRIM* расчеты атомных радиационных повреждений и концентрации вакансий в пленках InSb(100) при названных выше флюенсах показали их линейный рост и увеличение значений до 10 раз при максимальном флюенсе протонов. Предполагается, что в результате смещения атомов и накопления радиационных точечных дефектов происходит искажение кристаллической решетки InSb и уменьшается интегральная интенсивность пика дифракции. Отмечается, что при этих условиях облучения увеличиваются напряжение Холла и постоянная Холла, а также уменьшаются концентрация носителей заряда, их подвижность и удельная проводимость пленок. Перспективным представляется исследование радиационной стойкости структуры и электрических свойств пленок InSb после влияния протонов с энергией 1,5 МэВ и высокими флюенсами, которые составляют основу радиационного воздействия в космосе.

Ключевые слова: электрические свойства; структура; пленки InSb; облучение протонами.

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T23ME-003).

STRUCTURE AND ELECTRICAL PROPERTIES OF InSb HETEROEPITAXIAL FILMS AFTER EXPOSURE TO PROTONS WITH ENERGY OF 1.5 MeV

V. V. UGLOV^a, A. K. KULESHOV^a, D. P. RUSALSKY^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: A. K. Kuleshov (kuleshak@bsu.by)

Abstract. Indium antimonide (InSb) heteroepitaxial films on single-crystal gallium arsenide (GaAs) wafers with a thickness of 2.5–2.7 μm , obtained by vacuum explosive thermal evaporation, are studied. They have unique resistance to the ultra-low temperatures of outer space and a certain level of radiation exposure, and are used as the main element in the creation of various microelectronic devices. X-ray diffractometry is used to study changes in the structure and electrical properties (including in a magnetic field) of InSb(100) heteroepitaxial films on GaAs(100) substrates after exposure to protons with an energy of 1.5 MeV and fluences of $1 \cdot 10^{15}$, $5 \cdot 10^{15}$ and $1 \cdot 10^{16} \text{ H}^+$ per 1 cm^2 . It is determined that the angular position, integral intensity, diffraction peak broadening from InSb(100), crystal lattice parameter, electrical properties of the films and mechanical stresses in them do not change when the films are irradiated with protons up to a fluence of $1 \cdot 10^{15} \text{ H}^+$ per 1 cm^2 . It has been established that when films are exposed to protons with fluences of $5 \cdot 10^{15}$ and $1 \cdot 10^{16} \text{ H}^+$ per 1 cm^2 , there is a decrease in the integral intensity of the diffraction peak from InSb(100). Calculations of atomic radiation damage and vacancy concentration in InSb(100) films at the above-mentioned fluences, performed using the *SRIM* programme, showed their linear growth and an increase in values up to 10 times at the maximum proton fluence. It is assumed that the displacement of atoms and the accumulation of radiation point defects cause distortion of the InSb crystal lattice and a decrease in the integral intensity of the diffraction peak. It is noted that under these irradiation conditions, the Hall voltage and Hall constant increase, while the concentration of charge carriers, their mobility and the specific conductivity of the films decrease. It seems promising to study the radiation resistance of the structure and electrical properties of InSb films after exposure to protons with an energy of 1.5 MeV and high fluences, which form the basis of radiation exposure in space.

Keywords: electrical properties; structure; InSb films; proton irradiation.

Acknowledgements. The research was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project T23ME-003).

Введение

Одним из важнейших материалов, имеющих значительное применение в твердотельной микроэлектронике, является узкозонный полупроводник группы $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ антимонид индия (InSb). Материал обладает

высокой подвижностью электронов, большой длиной свободного пробега и широким диапазоном рабочих температур. Данные свойства стали причиной его использования в создании высокочувствительных фотоэлементов, датчиков Холла, оптических фильтров и других устройств. В настоящее время этот материал применяется в виде пленочных эпитаксиальных или гетероэпитаксиальных структур, получаемых методами молекулярно-лучевой эпитаксии, взрывного термического осаждения и т. д. Устройства, созданные с использованием пленочных кристаллов InSb, значительно часто применяются в атомной, аэрокосмической, научной индустрии.

Известно, что протоны с энергией 1–30 МэВ являются основным компонентом космического излучения на околоземной орбите. По этой причине при использовании материалов в космической и радиационной индустрии важно исследовать воздействие на них протонного излучения. Высокоэнергетические протоны могут создать структурные неоднородности, дефекты в кристаллической решетке материала, а также изменить концентрацию носителей заряда, их подвижность, удельную проводимость материала и другие электрические характеристики.

В научной литературе представлены данные о радиационной стойкости гетероэпитаксиальных пленок InSb на подложках арсенида галлия (GaAs) при облучении протонами с энергией 1,5 МэВ и флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ Н}^+$ на 1 см^2 [1]. При этом облучении в пленках происходят незначительные изменения электрических свойств. Радиационную стойкость электрических свойств проявляют гетероэпитаксиальные пленки InSb под действием облучения высокоэнергетическими электронами и гамма-квантами при поглощенной дозе порядка $5 \cdot 10^5$ рад [2]. Подобную поглощенную дозу ионизирующего излучения может накопить бортовая аппаратура при нахождении в радиационном поясе околоземного пространства в течение 5 лет. Согласно литературным источникам [3; 4] значения поглощенной дозы находятся в интервале от $5 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ рад.

Современные требования к радиационной стойкости материалов в атомной и космической индустрии обуславливают необходимость более высокой временной стабильности свойств материалов, а именно не менее 10 лет при более высоких поглощающих дозах протонов. По этой причине в данной работе при проведении экспериментов по облучению пленок InSb протонами с энергией 1,5 МэВ использовались высокие значения флюенсов ($1 \cdot 10^{15}$, $5 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ Н}^+$ на 1 см^2). Указанные значения флюенсов определялись на основе оценки имитации воздействия космического протонного облучения более 10 лет на околоземной орбите. Оценка была выполнена с опорой на литературные данные о среднем значении плотности потока протонов на геостационарной орбите, которое составляет порядка $1 \cdot 10^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [3]. Суммарное значение флюенса протонов за 10 лет равняется примерно $1 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+$ на 1 см^2 . Отметим, что поглощенная доза ионизирующего излучения в пленке InSb толщиной 2,5 мкм, оценка которой проводилась с использованием расчетных данных программы *SRIM* об энергетических потерях протонов в пленке, при энергии протонов 1,5 МэВ и флюенсе $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+$ на 1 см^2 составляет порядка $6,5 \cdot 10^7$ Гр.

Цель исследования – изучение изменений структуры и электрических свойств гетероэпитаксиальных пленок InSb(100) на подложках GaAs(100) после облучения протонами с энергией 1,5 МэВ и флюенсами $1 \cdot 10^{15}$, $5 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ Н}^+$ на 1 см^2 с использованием метода рентгеновской дифрактометрии. Также выясняются предельные значения флюенсов протонов, при которых свойства пленок ухудшаются.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являются гетероэпитаксиальные пленки InSb(100) на монокристаллических пластинах GaAs(100), полученные методом вакуумного взрывного термического испарения при температуре осаждения 375 °С, которая соответствует формированию гетероэпитаксиальных пленок InSb высокого качества [5]. Толщина полученных пленок, измеренных с помощью профилометра MarSurf PS10, составила 2,5–2,7 мкм.

Облучение пленок InSb протонами проводилось в Институте ядерной физики (Алма-Ата, Казахстан) при энергии 1,5 МэВ с токами пучка протонов в интервале от $35 \cdot 10^{-8}$ до $40 \cdot 10^{-8} \text{ А}$. При облучении измеряемая термопарой температура держателя образцов не превышала 60 °С.

Структурные изменения пленок InSb после протонного облучения исследовались с помощью метода рентгеновской дифрактометрии, реализованной посредством дифрактометра Ultima IV при излучении CuK_α в узкой области дифракции вблизи пика дифракции от InSb(100). В отличие от стандартной рентгеноструктурной съемки¹ данный метод позволил с более высокой точностью определить преобразование структурных параметров, механических напряжений гетероэпитаксиальных полупроводниковых пленок и появление дефектов на них. Смещение положения, изменение интенсивности и расширение пика дифракции от InSb(100) сравнивались с соответствующими параметрами необлученной пленки InSb

¹Каменская И. В. Электрофизические и тензoeлектрические свойства InSb и GaSb, облученных электронами, протонами и нейтронами : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.10. Томск, 2007. С. 23.

и эталонным значением угла 2θ для InSb(100), взятым из базы данных ICDD-PDF2. Как следует из проведенных ранее рентгеноструктурных исследований структуры пленок, на рентгеновской дифрактограмме гетероэпитаксиальных пленок InSb(100), полученных на монокристаллических пластинах GaAs(100) при температуре осаждения 375 °С, наблюдаются два основных пика дифракции – пик дифракции от InSb(100) с высокой интегральной интенсивностью и пик дифракции от GaAs(100) с меньшей интегральной интенсивностью в несколько сотен раз [5].

Методика измерения электрических свойств пленок InSb (напряжения Холла, постоянной Холла, концентрации и подвижности носителей заряда, удельной проводимости в магнитном поле и при нагревании на воздухе до 120 °С) представлена ниже. Соотношение между физическими величинами измеряемых электрических свойств пленки, размерами и толщиной пленки подробно описано в работе [5].

После осаждения через маску образцы пленок InSb представляли собой прямоугольные области размером 10 × 5 мм с пятью контактными площадками размером 1 × 1 мм (рис. 1). К этим площадкам приваривались золотые контакты, которые затем были приварены к контактным площадкам на плате. В свою очередь, к данным площадкам были припаяны провода, соединенные с приборами для соответствующих измерений.

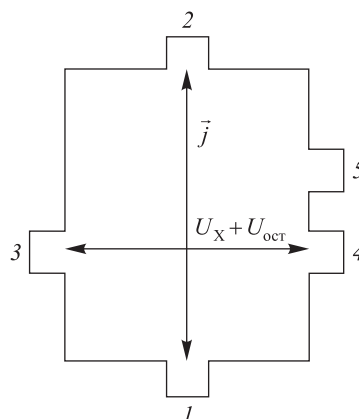


Рис. 1. Схема расположения контактов гетероэпитаксиальной пленки InSb для определения ее электрофизических свойств: 1, 2 – контакты для пропускания постоянного тока ($\vec{j}$); 3 – контакт для определения напряжения Холла (U_X) и остаточного напряжения ($U_{ост}$); 4 – контакт для определения напряжения Холла и остаточного напряжения, а также для измерения сопротивления; 5 – контакт для измерения сопротивления

Fig. 1. The arrangement of the contacts of the InSb heteroepitaxial film for determining its electrophysical properties:

1, 2 – contacts for passing direct current ($\vec{j}$); 3 – contact for determining the Hall voltage (U_X) and residual voltage ($U_{ост}$); 4 – contact for determining the Hall voltage and residual voltage as well as for measuring resistance; 5 – contact for measuring resistance

Примененная методика измерений позволила исключить контактные напряжения. Кроме того, определение напряжения между контактами 3 и 4 при пропускании тока без магнитного поля дало возможность измерить так называемое остаточное напряжение, которое возникло из-за неэквипотенциальности электрического поля, искаженного неточной симметрией контактов 3 и 4. Остаточное напряжение учитывалось при расчете чистого потенциала Холла под действием магнитного поля на образец пленки. Через контакты 1 и 2 пропусклся постоянный ток. При отсутствии поперечного магнитного поля измерялось значение остаточного напряжения между контактами 3 и 4. После включения создаваемого электромагнитом магнитного поля на заряды, проходившие через контакты 1 и 2, начала действовать сила Лоренца, из-за чего они смещались к какому-либо краю пленки. Таким образом была создана разность потенциалов Холла между контактами 3 и 4, которая фиксировалась с помощью вольтметра. Измерения напряжения Холла проводились в магнитном поле (0,44 ± 0,01) Тл. Величина тока через пленку составляла (10,0 ± 0,1) мА. Расчетная погрешность определения концентрации носителей заряда и их подвижности не превышала 5 %. В целях выявления электрических свойств образца пленки в электромагните была сделана полость для размещения данного образца на плате с выводными контактами наружу к приборам. Электромагнит с образцом пленки помещался в нагревательный шкаф для нагрева на воздухе и измерения всех электрических параметров (в том числе в магнитном поле). Контроль температуры на образце пленки и в нагревательном шкафу производился двумя термопарами хромель – алюминий.

Результаты и их обсуждение

Была сделана оценка радиационных повреждений (смещений атомов) и концентрации вакансий, созданных протонами с энергией 1,5 МэВ и флюенсами $1 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16}$ H⁺ на 1 см² в пленках InSb толщиной

2,5–2,7 мкм. Оценка выполнялась с использованием программы *SRIM* и данных об энергиях смещения атомов In и Sb. Установлено, что при воздействии протонов с энергией 1,5 МэВ в пленках InSb радиационные повреждения и концентрация вакансий постоянны по всей глубине с относительным среднеквадратичным отклонением до 20 %. Отметим, что при этой энергии протоны проходят через пленки не останавливаясь. В зависимости от названных выше флюенсов усредненные значения радиационных повреждений в пленках InSb составили $0,1 \cdot 10^{-2}$ и $1,0 \cdot 10^{-20}$ соответственно, а значения концентрации вакансий в них были равны $0,54 \cdot 10^{20}$ и $5,30 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Из полученных данных следует, что рост флюенса протонов приводит к пропорциональному росту смещения атомов и концентрации вакансий.

На рис. 2 представлены полученные в результате применения метода рентгеновской дифрактометрии кривые качания исходной пленки и образцов пленок, которые были облучены протонами с энергией 1,5 МэВ и флюенсами $1 \cdot 10^{15}$, $5 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ H}^+$ на 1 см^2 .

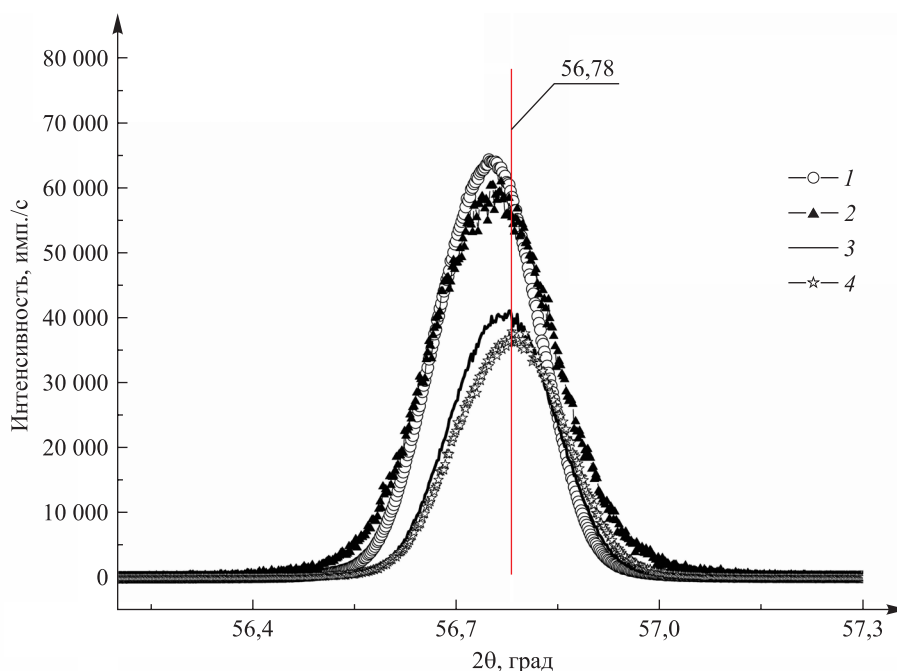


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма гетероэпитаксиальных пленок InSb в исходном состоянии (1) и после воздействия протонов с энергией 1,5 МэВ и флюенсами разной величины (2 – $1 \cdot 10^{15} \text{ H}^+$ на 1 см^2 ; 3 – $5 \cdot 10^{15} \text{ H}^+$ на 1 см^2 ; 4 – $1 \cdot 10^{16} \text{ H}^+$ на 1 см^2). Красная линия показывает значение угла 2θ для InSb(100) согласно базе данных ICDD-PDF2

Fig. 2. X-ray patterns of InSb heteroepitaxial films in the initial state (1) and after exposure to protons with energy of 1.5 MeV and fluences of different values (2 – $1 \cdot 10^{15} \text{ H}^+$ per 1 cm^2 ; 3 – $5 \cdot 10^{15} \text{ H}^+$ per 1 cm^2 ; 4 – $1 \cdot 10^{16} \text{ H}^+$ per 1 cm^2). The red line shows the value of the angle 2θ for InSb(100) according to the ICDD-PDF2 database

Из представленных на рис. 2 данных следует, что угол, соответствующий максимуму пика дифракции от InSb(100), не изменяется по отношению к углу, соответствующему пику дифракции от пленки в исходном состоянии, при флюенсе облучения протонами $1 \cdot 10^{15} \text{ H}^+$ на 1 см^2 . Значение параметра решетки InSb при этом флюенсе также не изменяется, оно является одинаковым в пределах погрешности измерений и составляет 0,648 1 нм. Небольшое отклонение этого значения от значения параметра решетки из базы данных ICDD-PDF2 для поликристаллического образца (0,647 9 нм) означает наличие небольших растягивающих механических напряжений в осажденной пленке, которые обычно наблюдаются после вакуумного осаждения пленки. При увеличении флюенса облучения протонами до $5 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ H}^+$ на 1 см^2 происходит приближение максимума пика дифракции к эталонному значению угла 2θ для InSb(100), т. е. релаксация механических напряжений, возникших при осаждении пленки. Также интегральная интенсивность пика дифракции от InSb(100) уменьшается в 1,6 раза. Предполагается, что уменьшение интегральной интенсивности пика дифракции обусловлено влиянием радиационных дефектов, создаваемых воздействием протонов в кристаллической решетке InSb и приводящих к смещению атомов In и Sb с идеальных положений в кристаллической решетке InSb в плоскости (100), в результате уменьшается интенсивность рентгеновской дифракции для InSb(100).

Результаты измерения электрических свойств гетероэпитаксиальных пленок InSb до и после облучения протонами с энергией 1,5 МэВ и флюенсами разной величины при комнатной температуре представлены в таблице. Зависимости постоянной Холла и удельной проводимости гетероэпитаксиальных пленок InSb в исходном состоянии и после облучения протонами с энергией 1,5 МэВ и флюенсами разной величины от температуры нагрева на воздухе (скорость нагрева составляла 3–4 °С/мин) показаны на рис. 3.

Электрические свойства гетероэпитаксиальных пленок InSb до и после облучения протонами с энергией 1,5 МэВ и флюенсами разной величины при комнатной температуре

Electrical properties of InSb heteroepitaxial films before and after irradiation with protons with energy of 1.5 MeV and fluences of different values at room temperature

Условия эксперимента	$U_H, 10^{-3} \text{ В}$	$R_H, 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Кл}$	$n, 10^{17} \text{ см}^{-3}$	$\mu, \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	$\sigma, \text{ См/см}$
Исходное состояние	110,6	83,0	0,9	4,9	170,1
Флюенс $1 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+$ на 1 см^2	135,2	89,0	0,7	3,7	126,0
Флюенс $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+$ на 1 см^2	236,0	155,0	0,4	0,9	20,9
Флюенс $1 \cdot 10^{16} \text{ Н}^+$ на 1 см^2	243,0	157,0	0,4	0,7	12,3

Примечание. R_H – постоянная Холла; n – концентрация носителей заряда; μ – подвижность носителей заряда; σ – удельная проводимость.

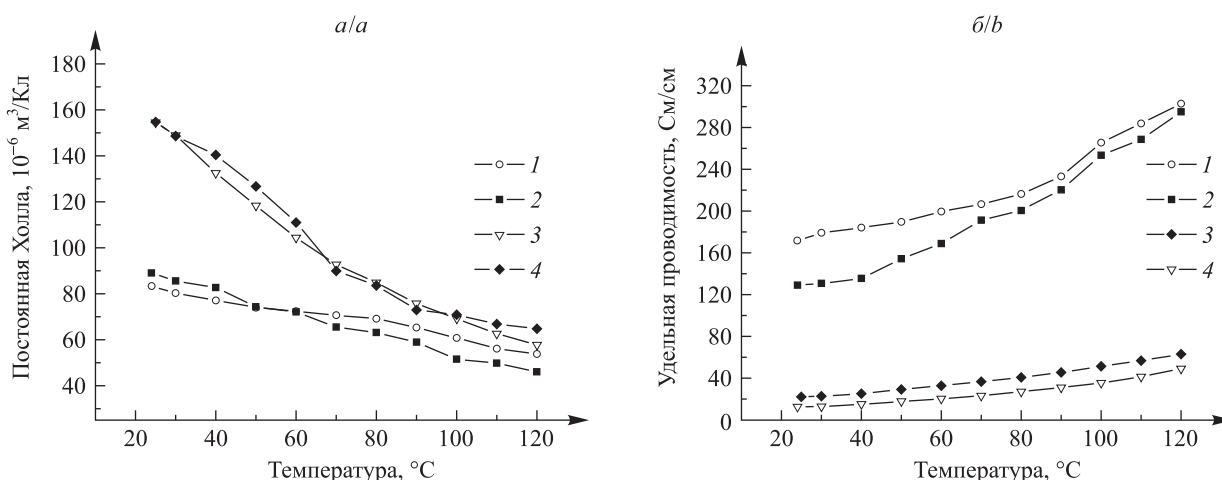


Рис. 3. Зависимости постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) гетероэпитаксиальных пленок InSb в исходном состоянии (1) и после облучения протонами с энергией 1,5 МэВ и флюенсами разной величины (2 – $1 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+$ на 1 см^2 ; 3 – $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+$ на 1 см^2 ; 4 – $1 \cdot 10^{16} \text{ Н}^+$ на 1 см^2) от температуры нагрева на воздухе

Fig. 3. Dependences of the Hall constant (a) and specific conductivity (b) of InSb heteroepitaxial films on the fluence of protons with energy of 1.5 MeV and fluences of different values (2 – $1 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+$ per 1 cm^2 ; 3 – $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+$ per 1 cm^2 ; 4 – $1 \cdot 10^{16} \text{ Н}^+$ per 1 cm^2) on the heating temperature in air

Представленные в таблице и на рис. 3 данные показывают, что электрические свойства гетероэпитаксиальных пленок InSb(100) на монокристаллических пластинах GaAs(100) при воздействии протонов с энергией 1,5 МэВ и флюенсом $1 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+$ на 1 см^2 близки к электрическим свойствам исходной пленки. Увеличение флюенса облучения протонами до $5 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ Н}^+$ на 1 см^2 ведет к изменению электрических свойств. Напряжение Холла и постоянная Холла увеличиваются, а концентрация носителей заряда, их подвижность, удельная проводимость пленки значительно уменьшаются. Отметим корреляцию между уменьшением интегральной интенсивности пика дифракции от InSb(100), зафиксированной кривыми качения, и ухудшением электрических свойств пленок при флюенсах облучения протонами $5 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ Н}^+$ на 1 см^2 . Исходя из представленных выше данных, радиационная стойкость пленок InSb(100) на пластинах GaAs(100) при воздействии протонов с энергией 1,5 МэВ определена до флюенса $1 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+$ на 1 см^2 . Следует отметить, что как в проведенных исследованиях², так и в данной работе максимальный флюенс протонов, использованный для облучения гетероэпитаксиальных пленок InSb,

²Каменская И. В. Электрофизические и тензoeлектрические свойства InSb и GaSb... С. 23.

не превышает $1 \cdot 10^{15} \text{ H}^+$ на 1 см^2 и не оказывает влияния на стабильность электрических свойств массивных кристаллических образцов InSb.

Основным типом точечных радиационных дефектов, возникающих при воздействии высокоэнергетических протонов на полупроводниковые материалы, являются пары Френкеля [6]. Как указано выше, накопление смещенных атомов и концентрация вакансий увеличиваются с ростом флюенса протонов. Известно, что при протонном воздействии на кристаллы InSb концентрация простейших точечных дефектов в подрешетке In имеет акцепторный характер, а в подрешетке Sb – донорный характер [7].

Предполагается, что уменьшение удельной проводимости пленок и изменение других их электрических свойств при флюенсах $5 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ H}^+$ на 1 см^2 связаны с превышением скорости создания концентрации акцепторных дефектов в подрешетке In по сравнению со скоростью появления донорных дефектов в подрешетке Sb. Кроме того, преобразование электрических свойств пленок может быть вызвано меньшей пороговой энергией смещения атома In (5,8 эВ) по сравнению с пороговой энергией смещения атома Sb (6,8 эВ) в решетке InSb [8].

Отметим, что электрические свойства пленок InSb не изменяются при возрастании флюенса от $5 \cdot 10^{15}$ до $1 \cdot 10^{16} \text{ H}^+$ на 1 см^2 . В случае массивных кристаллических образцов пленок InSb увеличение флюенса от $1 \cdot 10^{15}$ до $1 \cdot 10^{16} \text{ H}^+$ на 1 см^2 приводит к значительному линейному росту сопротивления, уменьшению удельной проводимости; значения электрических свойств изменяются почти в 100 раз³. В то же время значения электрических свойств гетероэпитаксиальных пленок InSb изменяются в 2–10 раз. По нашему мнению, такое отличие в изменениях электрических свойств кристаллов и пленок связано с компенсационными эффектами, т. е. с более высокой концентрацией дефектов (границ зерен микрорекристаллитов, точечных дефектов, сопутствующих осаждению, и т. д.) в осажденной пленке, чем в монокристалле. Данные дефекты взаимодействуют с радиационными дефектами, вводимыми облучением протонами, и аннигилируют их.

Заключение

С помощью метода рентгеновской дифрактометрии было установлено, что угловое положение, интегральная интенсивность, расширение пика дифракции от InSb(100) на монокристаллической пластине GaAs(100), а также параметр кристаллической решетки, электрические свойства пленки, механические напряжения в ней не изменяются при воздействии на пленку протонов с энергией 1,5 МэВ и флюенсом $1 \cdot 10^{15} \text{ H}^+$ на 1 см^2 . Таким образом, радиационная стойкость структуры и электрических свойств гетероэпитаксиальных пленок InSb(100) при облучении протонами определена до флюенса $1 \cdot 10^{15} \text{ H}^+$ на 1 см^2 .

При воздействии протонов с флюенсами $5 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ H}^+$ на 1 см^2 происходит уменьшение интегральной интенсивности пика дифракции от InSb(100). Предполагается, что этот результат является следствием искажения кристаллической решетки InSb ввиду смещения атомов и накопления радиационных точечных дефектов. Произведенные с использованием программы SRIM расчеты атомных радиационных повреждений и концентрации вакансий в пленках InSb(100) при названных выше флюенсах показали их линейный рост и увеличение значений до 10 раз при максимальном флюенсе протонов. Кроме того, при этих условиях облучения увеличиваются напряжение Холла и постоянная Холла, а также уменьшаются концентрация носителей заряда, их подвижность и удельная проводимость пленок. Предполагается, что уменьшение удельной проводимости пленок InSb(100) и изменение других их электрических свойств при флюенсах $5 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ H}^+$ на 1 см^2 связаны с превышением скорости создания концентрации акцепторных дефектов в подрешетке In по сравнению со скоростью появления донорных дефектов в подрешетке Sb.

Библиографические ссылки

1. Кулешов АК, Углов ВВ, Русальский ДП, Колесникова ЕА. Электрические свойства гетероэпитаксиальных пленок антимонида индия, облученных протонами с энергией 1,5 МэВ. В: Дудчик ЮИ, редактор. *Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния. Материалы VII Международной научно-практической конференции, посвященной 120-летию со дня рождения академика А. Н. Севченко; 18–19 мая 2023 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2023. с. 337–339.
2. Колесникова ЕА, Кулешов АК, Русальский ДП, Гуринович ВА. Радиационная стабильность датчиков, изготовленных на основе *n*-InSb–*i*-GaAs. В: Углов ВВ, редактор. *Взаимодействие излучений с твердым телом. Материалы 14-й Международной конференции, посвященной 100-летию Белорусского государственного университета; 21–24 сентября 2021 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2021. с. 530–533.
3. Dauphin J. Radiation effects in materials. *Radiation Physics and Chemistry*. 1994;43(1–2):47–56. DOI: 10.1016/0969-806X(94)90201-1.

³Каменская И. В. Электрофизические и тензоелектрические свойства InSb и GaSb... С. 23.

4. Fry RJM. Radiation effects in space. *Advances in Space Research*. 1986;6(11):261–268. DOI: 10.1016/0273-1177(86)90301-7.
5. Uglov VV, Drapezo AP, Kuleshov AK, Rusalsky DP, Kolesnikova EA. Effect of explosive thermal evaporation conditions on the phase composition, crystallite orientation, electrical and magnetic properties of heteroepitaxial InSb films on semi-insulating GaAs(100). *High Temperature Material Processes*. 2021;25(1):71–80. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2021038260.
6. Пинскер З. Рентгеновская кристаллооптика. Москва: Наука; 1982. 392 с.
7. Haris M, Veeramani P, Jayavel P, Hayakawa Y, Kanjilal D, Moorthy Babu S. High energy Sn ion implantation induced effects in InSb substrates. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*. 2006;244(1):179–182. DOI: 10.1016/j.nimb.2005.11.026.
8. Myasnikov AM, Gerasimenko NN. Ion implantation and thermal annealing of III–V compound semiconducting system: some problems of III–V narrow gap semiconductors. *Semiconductors and Semimetals*. 1997;46:257–293. DOI: 10.1016/S0080-8784(08)60111-8.

Получена 01.02.2025 / исправлена 20.02.2025 / принята 26.02.2025.
Received 01.02.2025 / revised 20.02.2025 / accepted 26.02.2025.