БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Kazyuchits N.M. et al. Effect of synthesis conditions on the impurity composition of STM Almazot diamond single crystals // Inorg. Mater. 2014. Vol. 50, № 2. P. 130–135.
2. Smith E., Dent G. Modern Raman spectroscopy - a practical approach. John Wiley & Sons Ltd, 2005.
3. Kazuchits N.M. et al. Luminescence of negatively charged single vacancies in diamond: ND1 center // Diam. Relat. Mater. 2022. Vol. 121, № September. P. 108741.
4. Zaitsev A.M. Optical Properties of Diamond. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001.
5. Винс В.Г., Елисеев А.П., Сарин В.А. Физические основы современных методов облагораживания природных алмазов и бриллиантов // Драгоценные металлы. Драгоценные камни. 2008. Vol. 12. P. 180.
6. Onoda S. et al. Diffusion of Vacancies Created by High‐Energy Heavy Ion Strike Into Diamond // Phys. status solidi. 2017. Vol. 214, № 11.
7. Rymzhanov R.A. et al. Recrystallization as the governing mechanism of ion track formation // Sci. Rep. 2019. Vol. 9, № 1. P. 3837.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНКАХ АНТИМОНИДА ИНДИЯ, ОБЛУЧЕННЫХ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 1,5 МэВ

А. К. Кулешов, В. В. Углов, Д. П. Русальский

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь
e-mail: kuleshak@bsu.by

Установлено, что радиационная стойкость к облучению протонами с энергией 1,5 МэВ комплекса электрических свойств, изменения структуры, механических напряжений гетероэпитаксиальной пленки антимонида индия, осажденной на пластины GaAs (100) достигает суммарного флюенса 10^{15} $H^+/см^{-2}$. Увеличение суммарного флюенса до 10^{16} $H^+/см^{-2}$ приводит к возникновению макронапряжений, значение Холловского потенциала, постоянной Холла увеличивается более чем в 2 раза, концентрация, подвижность носителей заряда уменьшаются.

Ключевые слова: пленки; антимонид индия; облучение протонами; электрические свойства.

ELECTRICAL PROPERTIES AND MECHANICAL STRESSES IN HETEROEPITAXIAL FILMS OF INDIUM ANTIMONIDE IRRADIATED WITH 1.5 MeV PROTONS

A. K. Kuleshov, V. V. Uglov, D. P. Rusalsky

Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: A. K. Kuleshov (kuleshak@bsu.by)

It has been established that the radiation resistance to irradiation with protons with an energy of 1.5 MeV of the complex of electrical properties, changes in structure, mechanical stresses of the heteroepitaxial film of indium antimonide deposited on GaAs (100) wafers reaches a total fluence of 10^{15} H^+/cm^{-2}. An increase in the total fluence to 10^{16} H^+/cm^{-2}

leads to the occurrence of macrostresses, the value of the Hall potential, the Hall constant increases more than 2 times, the concentration, mobility of charge carriers decrease.

Key words: films; indium antimonide; proton irradiation; electrical properties.

ВВЕДЕНИЕ

Высокоэнергетические ионизирующие частицы могут приводить к структурным изменениям, генерации радиационных дефектов, изменениям электрических свойств в полупроводниковых материалах. Воздействие высокоэнергетических протонов на чувствительный элемент в виде полупроводникового преобразователя Холла из антимонида индия вызывает в нем ряд изменений: уменьшение подвижности носителей заряда, увеличению сопротивления, росту механических напряжений и т.д. [1, 2]. Отметим, что свойства гетероэпитаксиальных пленочных структур антимонида индия на подложках арсенида галлия подобны монокристаллам и стабильны при низких температурах космического пространства. Такие пленки в виде чувствительных элементов применяются в микроэлектронных датчиках для измерения магнитного поля, тока, угла поворота и других физических величин, используемых в космосе, радиационной индустрии. Известно, что в пределах радиационных поясов Земли воздействие протонного облучения составляет наибольшую долю космической радиации, энергия протонного облучения находится в интервале от 0,5 до 10 МэВ.

В связи с этим актуальной целью работы является установление закономерностей изменения электрических свойств, в том числе в магнитном поле, структурных изменений, вызываемых механическими напряжениями в гетероэпитаксиальных пленках антимонида индия, в зависимости от значительного времени облучения протонами с энергией 1,5 МэВ и суммарными флюенсами в интервале 10^{15}–10^{16} $H^{+}/см^{-2}$. При максимальном суммарном флюенсе поглощенная доза протонного облучения в пленках антимонида индия, оцененная с использованием программы SRIM достигает величин более 400 кГр.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

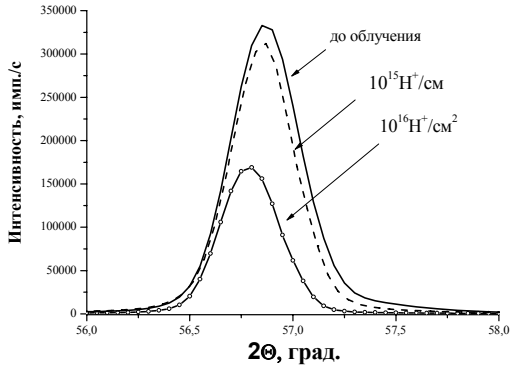
Обьектом экспериментальных исследований были гетероэпитаксиальные пленки антимонида индия, осажденные на пластины GaAs (100) методом взрывного термического испарения, с толщиной 2,6–2,8 мкм. Описание метода, условий осаждения пленок, методики измерения их электрических свойств представлены в работе [3]. Облучение протонами проводилось в РГП Институт ядерной физики г. Алматы (Казахстан) при энергии 1,5 МэВ с токами пучка протонов в интервале 35–40 10^{-8} А. Измерения параметра кристаллической решетки и определение механических напряжений пленок проводились с помощью метода кривых качания на дифрактометре Rigaku Ultima IV.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования изменения структуры гетероэпитаксиальных пленок InSb (100) на монокристаллических подложках GaAs (100) в зависимости от суммарного флюенса 10^{15} и 10^{16} $см^{-2}$ воздействия протонов с использованием кривых качания показаны на рисунке. Так как, пленка имеет гетероэпитаксильную структуру, то на рисунке показан узкий интервал дифракционных углов соответствующий угловому положению антимонида индия (100). Из представленных на рисунке данных следует, что при суммарном флюенсе 10^{15} $H^{+}/см^{-2}$ угловое положение и интенсивность дифракционного пика антимонида индия не изменяется.

Для значения 10^{16} $H^+/см^{-2}$ наблюдается снижение интенсивности дифракционного пика InSb (100) и смещение его максимума. Смещение пика определяется возникновением механических макронапряжений в пленке, рассчитанное значение которых составило 32 МПа. Уменьшение интенсивности дифракционного пика происходит, возможно, в результате искажения кристаллической решетки антимонида индия за счет накопления радиационных дефектов и возникновения механических напряжений 3-го рода.

Были сделаны оценки радиационных повреждений и концентрации вакансий, созданных протонами с энергией 1,5 МэВ в антимониде индия, для значений флюенсов протонов 5 $10^{15}\cdot H^+/см^2$ и 10^{16} $H^+/см^2$ с использованием программы SRIM и литературных данных энергий смещения атомов In и Sb в антимониде индия. Рассчитано, что в пленке антимонида радиационные повреждения (сна) и концентрации вакансий постоянны по всей глубине с относительным среднеквадратичным отклонением до 20 %. Усредненные значения радиационных повреждений и концентрация вакансий в пленках InSb, в зависимости от двух значений флюенса, составили соответственно: (0,2 и 0,3) 10^{-2} сна; концентрации вакансий (0,54 и 0,81) 10^{20} $см^{-3}$.



Кривые качания рентгеновской дифрактометрии гетероэпитаксиальных пленок InSb (100) в зависимости от суммарного флюенса 10^{15} и $10^{16}\cdot см^{-2}$ воздействия протонов

Результаты измерений электрических свойств гетероэпитаксиальных пленок, облученных протонами представлены в таблице.

Электрические свойства (холловское напряжение – *U*x; постоянная Холла – *R*x; концентрация – *n* и подвижность носителей заряда – μ) гетероэпитаксиальных пленок антимонида индия, в зависимости от величины суммарного флюенса воздействия протонов с энергией 1,5 МэВ

Флюенс, $H^+/см^{-2}$	*U*x, $(10^{-3}$ В)	*R*x, $(10^{-5}$ $м^3$ $Кл^{-1})$	*n*, $(10^{17}\cdot см^{-3})$	μ, $м^2\cdot В^{-1}\cdot с^{-1}$
исходный	110	7,3	3,08	4,3
10^{15}	145	8,9	2,90	2,9
$5\cdot10^{15}$	236	16,1	1,80	0,95
10^{16}	243	15,7	1,80	0,73

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из данных таблицы следует, что при суммарном флюенсе 10^{15} $H^+/см^{-2}$ электрические свойства облученных пленок близки к исходной пленке. С ростом суммарного флюенса от $5 \cdot 10^{15}$ $H^+/см^{-2}$ до 10^{16} $H^+/см^{-2}$ значение Холловского потенциала, постоянной Холла увеличивается более чем в 2 раза, концентрация, подвижность носителей заряда значительно уменьшаются. Отметим, что эти изменения меньше, чем увеличениие постоянной Холла для монокристаллов InSb, облученных протонами с энергией 10 Мэв и подобными флюенсами [4]. Установлено, что радиационная стойкость к облучению протонами с энергией 1,5 МэВ комплекса электрических свойств, изменения структуры, механических напряжений гетероэпитаксиальной пленки антимонида индия, осажденной на пластины GaAs (100) достигает суммарного флюенса 10^{15} $H^+/см^{-2}$.

Работа выполнена в рамках НИР БРФФИ Т23МЭ-003 «Синтез эпитаксиальных пленок антимонида индия для магниточувствительных микросенсоров, стойких к высоким дозам радиационного воздействия»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Технология СБИС: в 2-х кн. / под ред. С. Зи. – М. : Мир, 1986. – Кн. 1. – 404 с.; Кн. 2. – 453 с.
2. Е.А. Колесникова, В.В. Углов, А.К. Кулешов, Д.П. Русальский, В.А. Гуринович, Радиационная стабильность датчиков, изготовленных на основе n-InSb-i-GaAs // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 14-ой Международной конференции / БГУ. – Минск, 2021. – с. 530–533.
3. V.V. Uglov, A.P. Drapezo, A.K. Kuleshov, D.P. Rusalsky, E.A. Kolesnikova 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 (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes), – 2021. – V. 25, – Iss. 1 – P. 1–80.
4. И.В. Каменская Электрофизические и тензоэлектрические свойства InSb и GaSb, облученных электронами, протонами и нейтронами : автореф. дис. канд. ф.-м. н. / И. В. Каменская; Сибирский физико-технический институт; Томский государственный педагогический университет – Томск, 2007. − 23 с.

ВЛИЯНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ НА СКОРОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ И КРЕМНИЙ-ГЕРМАНИЕВЫХ СПЛАВАХ

С. Б. Ластовский[1], Л. Ф. Макаренко[2]

[1)] Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Беларусь, e-mail: lastov@ physics.by

[2)] Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: makarenko@bsu.by

Методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) проведено сравнительное изучение влияния энергетического спектра пучка быстрых электронов с первоначальной энергией 6 МэВ на процессы радиационного дефектообразования в кремнии и кремний-германиевых сплавах. Показано, что при толщине экранов меньше экстраполированного пробега электронов скорость образования комплексов с участием только одного первичного радиационного дефекта остается практически