

СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК АНТИМОНИДА ИНДИЯ, ИОНАМИ КРИПТОНА С ЭНЕРГИЕЙ 145 МЭВ

Е. В. Тетеруков, Е. А. Колесникова

teterukov67@mail.ru;

Научный руководитель — В. В. Углов, доктор физико-математических наук

В работе рассматриваются результаты исследования структуры и электрических свойств гетероэпитаксиальных пленок антимонида индия, синтезированных методом взрывного термического испарения на подложках арсенида галлия. Пленки были облучены ионами криптона с энергией 145 МэВ и флюенсами 10^{12} и $5 \cdot 10^{12}$ см⁻². Установлено, что в процессе облучения увеличивается величина макронапряжений (59,4 МПа и 506 МПа при флюенсах 10^{12} см⁻² и $5 \cdot 10^{12}$ см⁻² соответственно), что связано с возникающими вдоль границы трека напряжениями. Изменение электрических свойств обусловлено амфотерной природой дефектных комплексов.

Ключевые слова: антимонид индия; эпитаксиальные пленки; ионное облучение; макронапряжения; электрические свойства; постоянная Холла.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гетероэпитаксиальные пленки толщиной $(2,20 \pm 0,05)$ мкм InSb были синтезированы методом взрывного термического испарения монокристаллического порошка InSb на полуизолирующие пластины GaAs [1]. Пленки облучались при комнатной температуре ионами Kr с энергией 145 МэВ и флюенсом 10^{12} и $5 \cdot 10^{12}$ см⁻². Для исследования структуры использовалась высокоразрешающая рентгеновская дифракция. Электрические свойства (удельное электросопротивление и эффект Холла) исследовали четырехконтактным методом. Величина макронапряжений определяется сдвигом положения основного дифракционного пика InSb (100) в исходном образце относительно облученного и рассчитывается по соотношению:

$$\sigma = -\frac{E d - d_0}{\nu d_0}, \quad (1)$$

где d – межплоскостное расстояние облученного образца, d_0 – межплоскостное расстояние исходного, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены кривые качания исходной пленки и образцов пленок, облученных ионами Kr^+ энергией 145 МэВ дозами 10^{12} $см^{-2}$ и $5 \cdot 10^{12}$ $см^{-2}$.

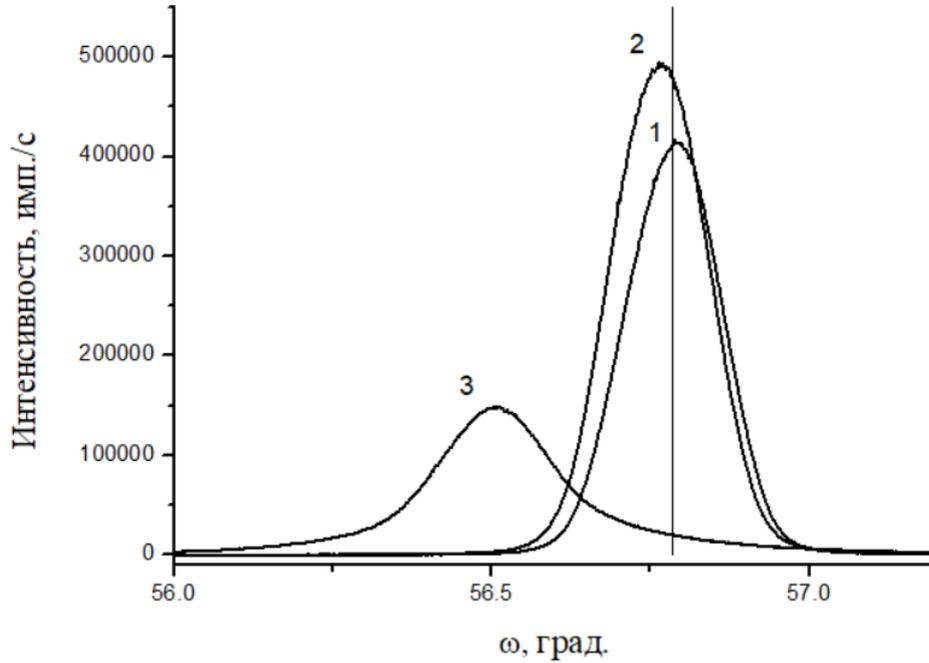


Рис. 1. Кривые качания образцов пленок InSb(100):

1 – исходный; 2 – 10^{12} $см^{-2}$,

3 – $5 \cdot 10^{12}$ $см^{-2}$

Гистограмма изменения величины макронапряжений в зависимости от дозы облучения высокоэнергетическими ионами криптона представлена в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость величины макронапряжений от дозы облучения

Доза, $см^{-2}$	Макронапряжения, МПа
10^{12}	59,4
$5 \cdot 10^{12}$	506

Из полученных данных видно, что при облучении пленок InSb ионами криптона с энергией 145 МэВ наблюдается рост макронапряжений на 59,4 МПа и 506 МПа при флюенсах 10^{12} $см^{-2}$ и $5 \cdot 10^{12}$ $см^{-2}$ соответственно. Предполагается, что рост величины макронапряжений в исследуемых пленках обусловлен взаимодействием поврежденного слоя, индуцированного вдоль треков, и остальной пленкой [2].

В таблице 2 представлены дозовые зависимости удельного сопротивления, концентрации носителей заряда, коэффициента Холла и коэффициента чувствительности пленок InSb при комнатной температуре.

Таблица 2

Электрические свойства пленок InSb, облученных ионами Kr с энергией 145 МэВ: удельное сопротивление (ρ), концентрации (n) носителей заряда, коэффициент Холла (R_H) и холловская чувствительность к магнитному полю (γ)

Доза, см ⁻²	ρ , 10 ⁻⁵ Ом·м	n , 10 ¹⁷ см ⁻³	R_H , 10 ⁻⁵ м ³ Кл ⁻¹	γ , мВ·Тл ⁻¹
Исходный	1,64±0,04	2,23±0,02	2,80±0,03	128±2,6
10 ¹²	56,2±0,10	0,55±0,01	11,4±0,10	518±9,9
5·10 ¹²	40,5±0,10	24,2±0,20	0,26±0,01	11,8±0,2

В общем случае сопротивление пленок является интегральной характеристикой, определяемой несколькими параметрами. Одним из таких параметров является концентрация носителей заряда, которая зависит от концентрации и природы радиационных дефектов в пленке. Согласно модели амфотерных дефектов, тип доминирующих дефектов определяется положением уровня Ферми E_F относительно положения уровня в эталоне E_{FS} [3]. Когда $E_F > E_{FS}$ энергия образования акцепторных дефектов уменьшается, поэтому образование собственных дефектов акцепторного типа становится энергетически выгодным.

Из полученных экспериментальных исследований удельного электросопротивления и концентрации носителей заряда в пленках антимонида индия следует, что в процессе облучения в пленке формируются вакансии атомов сурьмы V_{sb} . При условии $E_F > E_{FS}$ такие дефекты релаксируют с переходом атома индия в вакансию V_{sb} и, следовательно, образуется вакансия атома индия:



Такой тип дефекта является акцептором, образование которых приводит к уменьшению концентрации носителей заряда при облучении ионами криптона с энергией 145 МэВ и флюенсом 10¹² см⁻². При этом стоит учитывать, что положение E_F в процессе облучения нестабильно и при достижении некоторой концентрации дефектов становится устойчивым [3]. Увеличение флюенса до 5·10¹² см⁻² при облучении ионами криптона приводит к смещению E_F ниже эталонного уровня E_{FS} . При этом образование донорных комплексов типа:



становится энергетически выгодным, и как вследствие, наблюдается рост концентрации носителей заряда.

Из данных таблицы 2 следует, что облучение пленок флюенсом 10^{12} см⁻² приводит к резкому увеличению чувствительности холловского напряжения к магнитному полю. В частности, это связано с увеличением коэффициента Холла. Уменьшение концентрации носителей заряда при облучении флюенсом до 10^{12} см⁻² приводит к тому, что на торцах пленки скапливается меньший статический заряд, электрическое поле которого компенсирует силу Лоренца, смещающую электроны в магнитном поле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальное исследование кристаллической структуры пленок после облучения с помощью высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии показало рост величины макронапряжений на 59,4 МПа и 506 МПа при флюенсах 10^{12} см⁻² и $5 \cdot 10^{12}$ см⁻² соответственно. Предполагается, что это связано с наличием поврежденного слоя, индуцированного вдоль траектории иона.

Измерения удельного электросопротивления и эффекта Холла показали, что при всех дозах наблюдается значительное накопление радиационных дефектов, что приводит к значительному уменьшению подвижности носителей заряда. С другой стороны, рекомбинационное действие дефектов, обусловленное их амфотерной природой, привело к уменьшению концентрации носителей заряда и, как следствие, увеличению постоянной Холла и чувствительности к магнитному полю γ . Но интенсивное образование донорных дефектов, обусловленное положением уровня Ферми относительно положения в эталонном образце, привело к росту концентрации носителей заряда и резкому уменьшению чувствительности к магнитному полю.

Библиографические ссылки

1. Uglov V. V., Drapezo A.P., Kuleshov A.K., Rusalsky D.P., Kolesnikova E.A. 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.
2. Anisotropic plastic deformation by viscous flow in ion tracks / T. van Dillen [et al.] // *Physical Review. B: Condensed Matter and Materials Physics*. 2005. Vol. 71. P. 024103.
3. Walukiewicz, W. Intrinsic limitations to the doping of wide-gap semiconductors / W. Walukiewicz // *Physica B*. 2001. Vol. 302. P. 123–134.