

Важно также понимать, что биологический возраст может отличаться от хронологического (фактически прожитых лет) и может быть разным у разных людей.

Внедрение методов определения биологического возраста в современные системы поддержки принятия медицинских решений на основе разрабатываемых в настоящее время моделей сердечно-сосудистой системы позволит получить более точную картину состояния здоровья и принять меры по его поддержанию или улучшению [1–3].

#### Литература

1. Фролов, С. В. Система поддержки принятия врачебных решений в кардиологии на основе цифрового двойника сердечно-сосудистой системы / С. В. Фролов, А. А. Коробов, А. Н. Ветров // Моделирование, оптимизация и информ. технологии. – 2023. – № 11. – С. 1–15.
2. Модель сердечно-сосудистой системы с регуляцией на основе нейронной сети / С. В. Фролов [и др.] // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2021. – № 2. – С. 79–94.
3. Combined Method of Neurocontrol for Nonlinear Non-Stationary Object / S. V. Frolov [et al.] // Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA) : 2nd International Conference on Control Systems, 2020. – P. 582–585.

### СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНКАХ InSb ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ Kr

Р. Н. Михасёв

Белорусский государственный университет, г. Минск

Научные руководители: В. В. Углов, А. К. Кулешов

*При облучении ионами криптона с энергией 145 МэВ и флюенсом  $10^{12}$  и  $5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> в гетероэпитаксиальных пленках InSb на монокристаллических пластинах GaAs возникают значительные макро- и микронапряжения, достигающие, соответственно, значений 4 и 0,1 ГПа. Отличия температуры осаждения и структурных особенностей исходных гетероэпитаксиальных пленок не влияют на динамику накопления микро- и микронапряжений в пленках под воздействием ионов криптона высокой энергии. Причиной таких возникающих высоких значений макро- и микронапряжений с ростом флюенса облучения криптоном предположительно является формирование объемных трековых дефектов ионов криптона.*

**Ключевые слова:** материалы микроэлектроники, изменение микроструктуры, антимоноид индия, воздействия высокоэнергетических ионов криптона.

Развитие радиоэлектроники для применения в атомной энергетике, космической отрасли предъявляет повышенные требования к радиационной стойкости материалов, используемых в измерительных приборах, микросхемах и других электронных компонентах. Ионизирующие излучения приводят к генерации радиационных дефектов, структурным изменениям другим эффектам, оказывающим отрицательное влияние на эксплуатационные свойства приборов и устройств на их основе.

Антимонид индия InSb является важным полупроводниковым материалом для изготовления широкого спектра микроэлектронных датчиков. Свойства антимоноида индия позволяют использовать его в области микроэлектроники для производства датчиков Холла, различных типов датчиков физических величин и т. д. [1]. Известно, что устройства микроэлектронного исполнения на основе гетероэпитаксиальных

пленок InSb на монокристаллической основе GaAs, например, датчики Холла обладают уникальной стойкостью к сверхнизким температурам открытого космоса, а также высокой радиационной стойкостью, соответствующей современным эксплуатационным дозовым нагрузкам космических аппаратов на околоземной орбите [2].

Для имитации высоких дозовых нагрузок ионного воздействия на структурные изменения в гетероэпитаксиальных пленках InSb в данной работе использовалось облучение ионами криптона с энергией 145 МэВ и флюенсом  $10^{12}$  и  $5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Объектами исследования в данной работе были гетероэпитаксиальные пленки InSb на монокристаллических пластинах GaAs, полученных методом взрывного термического испарения при двух температурах осаждения 375 и 430 °С, которые являются границами температурного интервала получения гетероэпитаксиальных пленок InSb высокого качества из InSb [3]. Измеренная с помощью профилометра толщина пленок составила  $2,0 \pm 0,1$  мкм.

Структурные изменения пленок InSb исследовались с помощью метода качания высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии (прибор Ultima-4). Использование кривых качания позволяет с более высокой точностью определять структурные изменения пленок, чем при стандартных условиях рентгеноструктурных съемок. Определение структурных параметров производилось по смещению положения и уширению пиков кривых качания. В общем случае полная ширина дифракционного пика на полувысоте определяется микронапряжениями в микрокристаллитах, размером микрокристаллитов исследуемой пленки и инструментальным уширением прибора. Инструментальное уширение прибора в исследуемом интервале углов дифракции было определено при съемке кривых качания монокристалла GaAs. При дальнейших расчетах инструментальное уширение вычиталось из экспериментальных дифракционных пиков по модели Лоренца и далее в работе при расчетах использовался «чистый» от инструментального уширения дифракционный пик. Уширение и смещение пика относительно эталонных значений InSb из базы данных ICDD-PDF2 использовалось для определения структурных изменений в пленке под действием ионного воздействия. Величина возникающих под действием ионного воздействия криптона микронапряжений в кристаллической пленке InSb определялась по относительному смещению центра тяжести экспериментального дифракционного пика InSb относительно эталонного межплоскостного расстояния InSb умноженное на отношение модуля Юнга к коэффициенту Пуассона. Для приведенных в работе оценок микронапряжений использовались наиболее авторитетные литературные данные [4], для значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона InSb ( $E = 4,09 \cdot 10^{10}$  Па,  $\nu = 0,35$ ).

Отметим, что данные растровой электронной микроскопии показали, что существенного изменения размеров микрокристаллитов пленки под действием ионного облучения криптоном не происходило. Тогда ширина дифракционного пика на полувысоте определяется только микронапряжениями кристаллитов пленки.

Результаты исследования гетероэпитаксиальных пленок InSb на монокристаллических подложках GaAs в зависимости от температуры осаждения пленки и воздействия ионов криптона с энергией 145 МэВ и флюенсом  $10^{12}$  и  $5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> с помощью метода качания высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии представлены на рис. 1.

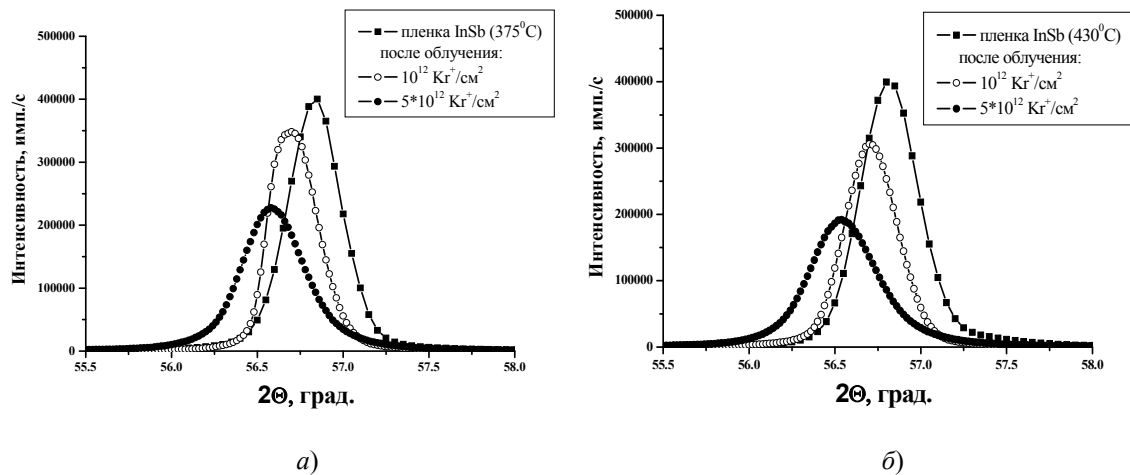


Рис. 1. Кривые качания рентгеновской дифрактометрии гетероэпитаксиальных пленок InSb на монокристаллических подложках GaAs в зависимости от температуры осаждения пленки и воздействия ионов криптона с энергией 145 МэВ и флюенсом  $10^{12}$  и  $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ :  
 а – 375 °С; б – 430 °С

Результаты определения микро- и макронапряжений в пленке InSb после воздействия ионов в соответствии с методикой описанной выше представлены в таблице.

**Изменение макро- и микронапряжений в гетероэпитаксиальных пленках InSb на подложках GaAs в зависимости от температуры осаждения пленки 375 и 430 °С и флюенса  $10^{12}$  и  $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  воздействия ионов криптона с энергией 145 МэВ**

Температура осаждения пленок InSb, °С	Флюенс ионов криптона с энергией 145 МэВ, ( $\text{см}^{-2}$ )	Макронапряжения, ГПа	Микронапряжения, ГПа
375	$10^{12}$	-0,1	0,096
	$5 \cdot 10^{12}$	-3,3	0,127
430	$10^{12}$	-0,1	0,096
	$5 \cdot 10^{12}$	-4,1	0,127

Представленные в таблице данные показывают возникновение высоких значений как микронапряжений, так и сжимающих (знак минус в таблице об этом свидетельствует) макронапряжений с ростом флюенса облучения криптоном пленок InSb. Такие значительные структурные изменения в виде возникновения высоких значений макро- и микронапряжений в пленках не могут быть объяснены накоплением точечных дефектов или их комплексов дефектов, которые возникают в результате упругих смещений атомов под действием ионного воздействия известными в литературе. Моделирование потерь энергии ионов криптона с использованием программы SRIM показало, что диссипация ионов криптона с такой высокой энергией в InSb происходит преимущественно на электронной подсистеме, что с большой вероятностью может приводить к формированию объемных трековых дефектов в результате разогрева и плавления материала вдоль траектории иона криптона.

Как следует из представленных данных, после облучения ионами криптона с энергией 145 МэВ и флюенсом  $10^{12}$  и  $5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> в гетероэпитаксиальных пленках InSb на монокристаллических пластинах GaAs возникают значительные макро- и микронапряжения с ростом величины флюенса ионов криптона, достигающих, соответственно, значений 4 и 0,1 ГПа. Отличия температуры осаждения и структурные особенности исходных гетероэпитаксиальных пленок не влияют на динамику накопления микро- и макро напряжений в пленках под воздействием ионов криптона. Причиной таких возникающих высоких значений макро- и микронапряжений, а также отсутствия динамики с ростом флюенса облучения криптоном является формирование объемных трековых дефектов ионов криптона в пленке антимолибдита индия.

#### Л и т е р а т у р а

1. Болванович, Э. И. Полупроводниковые пленки и миниатюрные измерительные преобразователи / Э. И. Болванович. – Минск : Наука и техника, 1981. – 214 с.
2. Радиационная стабильность датчиков, изготовленных на основе n-InSb-i-GaAs / Е. А. Колесникова [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 14-й Междунар. конф., Минск, 21–24 сент. 2021 г. / Белорус. гос. ун-т. – Минск, 2021. – С. 530–533.
3. 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) / V. V. Uglov [et al.] // High Temperature Material Processes. – 2021. – Vol. 25 (1). – P. 71–80.
4. Heteroepitaxy of Semiconductors: Theory, Growth, and Characterization. Second edition / J. E. Ayer [et al.]. – New York : CRC Press, 2017. – 627 p.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ NI MULTISIM ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕГУЛЯТОРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Д. Ю. Мельников

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель М. Н. Погуляев

*В программной среде NI Multisim представлены имитационные модели аналоговых регуляторов различного типа, используемых в системах управления электроприводами. Приведены результаты исследований регуляторов на имитационных моделях.*

**Ключевые слова:** имитационная модель, регулятор, система управления, преобразователь, электропривод.

Регулируемый электропривод сегодня является основным видом автоматизированного электропривода. Системы автоматического управления, применяемые в электроприводах и промышленных установках, должны обеспечить значение самых разных величин с заданной точностью. Основным элементом, позволяющим выполнить указанную функцию, является регулятор. Регулируя параметры преобразованной электрической энергии (частоту, напряжение, форму и длительность импульсов), удастся получить требуемые для регулируемого привода механические и динамические характеристики. В связи с этим правильный выбор регулятора и его параметров является актуальной задачей. Проведение исследований работы различных электромеханических устройств, не создавая физической модели, наиболее удобно проводить на имитационных моделях [1, 2]. Для этих целей разработано достаточно много различных программ.