

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК InSb ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНОВ Kr С ЭНЕРГИЕЙ 145 МэВ

А.К. Кулешов, В.В. Углов, Д.П. Русальский, Р.Н. Михасев  
*Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, Минск 220030,  
Беларусь, kuleshak@bsu.by, uglov@bsu.by, rusalsky@bsu.by, akil.belarusian@gmail.com*

В работе изучено воздействие облучения ионами криптона с энергией 145 МэВ с флюенсами в интервале значений от  $10^{12}$  Kr<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> до  $10^{13}$  Kr/см<sup>2</sup> на изменение электрических и гальваномангнитных свойств гетероэпитаксиальных пленок антимонида индия (100) на подложках арсенида галлия. Установлено, что при увеличении значения флюенса ионов криптона уменьшается подвижность носителей, значительно увеличивается удельное сопротивление и постоянная Холла. Максимальное изменение электрофизических параметров пленки проявляется при флюенсе ионов криптона  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>. При более высоких флюенсах облучения значение постоянной Холла близко к исходному. Предполагается, что наблюдаемые экспериментальные зависимости свойств пленки определяются скоростями создания дефектов акцепторного и донорного типа, связанных с плотностью создания трековых разупорядоченных областей от значений флюенса ионов криптона.

**Ключевые слова:** гетероэпитаксиальные пленки n-InSb; ионы Kr с энергией 145 МэВ; электрические и гальваномангнитные свойства; радиационная стабильность.

## ELECTRICAL AND GALVANOMAGNETIC PROPERTIES OF InSb HETEROEPITAXIAL FILMS AFTER EXPOSURE TO Kr IONS WITH AN ENERGY OF 145 MeV

A.K. Kuleshov, V.V. Uglov, D.P. Rusalsky, R.N. Mihasev  
*Belarusian State University, 4 Nezavisimosty Ave., 220030 Minsk, Belarus,  
kuleshak@bsu.by, uglov@bsu.by, rusalsky@bsu.by, akil.belarusian@gmail.com*

The work studies the effect of irradiation with krypton ions with an energy of 145 MeV with fluences in the range of values from  $10^{12}$  Kr<sup>+</sup>/cm<sup>2</sup> to  $10^{13}$  Kr/cm<sup>2</sup> on the change in the electrical and galvanomagnetic properties of heteroepitaxial films of indium antimonide (100) on gallium arsenide substrates. It has been established that with an increase in the krypton ion fluence, the carrier mobility decreases, and the specific resistance and Hall constant increase significantly. The maximum change in the electrophysical parameters of the film is observed at a krypton ion fluence of  $10^{12}$  cm<sup>-2</sup>. At higher irradiation fluences, the Hall constant value is close to the initial value. It is assumed that the dynamics of acceptor and donor type defects creation at a fluence of  $10^{12}$  cm<sup>-2</sup> is shifted towards the creation of a significant concentration of acceptor type defects. An increase in fluence leads to a decrease in the dominance of acceptor type defects due to an increase in the concentration of donor type defects accompanied by an increase in the number of track disordered regions.

**Keywords:** n-InSb heteroepitaxial films; Kr ions with energy 145 MeV; radiation stability; electrical and galvanomagnetic properties.

### Введение

Один из важнейших материалов, имеющих значительное применение в твердотельной микроэлектронике - это узкозонный полупроводник группы АЗВ5, антимонид индия. Материал обладает высокой подвижностью электронов, большой длиной свободного пробега и широким диапазоном рабочих температур. Его используют в создании высокочувствительных фотоэлементов, датчиков Холла, оптиче-

ских фильтров и других устройств. В настоящее время этот материал применяется в виде эпитаксиальных или гетероэпитаксиальных пленок, получаемых методами вакуумного осаждения. Микроэлектронные устройства с использованием пленок антимонида индия широко используются в атомной, аэрокосмической промышленности для которых характерно значительное радиационное воздействие, которое может приводить к ухудшению электрофи-

зических свойств пленок и устройств на их основе. Поэтому проводятся широкие исследования радиационного воздействия электронов, ионов, протонов, гамма-квантов и других типов воздействий для определения интервалов изменения электрофизических свойств пленок с ростом поглощающей дозы радиационного воздействия.

Как показано в литературе [1-4], при воздействии высокоэнергетических электронов,  $\gamma$ -квантов, протонов электрические и гальваномагнитные свойства пленок проявляют радиационную стойкость, которая соответствует дозовым нагрузкам в интервале 200-1000 крад. Перспективно изучить свойства гетероэпитаксиальных пленок InSb на GaAs при действии ионов высокой энергии и высоких радиационных доз поглощения для определения дозового интервала эксплуатации пленочных структур в космосе, атомной отрасли и других радиационных приложений.

Для создания высоких дозовых нагрузок в данной работе использовалось облучение ионами криптона с энергией 145 МэВ и флюенсах  $10^{12}$ ,  $5 \cdot 10^{12}$ ,  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ , что соответствовало, согласно проведенным оценкам, максимальной поглощенной дозе 2000 кГр.

Целью работы являлось изучение изменения электрических и гальваномагнитных свойств гетероэпитаксиальных пленок InSb на монокристаллических подложках GaAs после воздействия ионов криптона в указанном интервале флюенсов.

## Материалы и методы исследования

Объектами исследования в данной работе были гетероэпитаксиальные пленки InSb, толщиной 2.7 мкм на монокристаллических пластинах GaAs (100), полученные методом взрывного термического испарения при двух температурах осаждения 375 и 430°C, которые являются границами температурного интервала получения гетероэпитаксиальных пленок InSb высокого качества [5]. Облучение ионами криптона проводилось при комнатной

температуре на линейном ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 (Институт ядерной физики, Казахстан). Методики измерений электрических и гальваномагнитных свойств, в том числе при температурном воздействии до 100°C, измерения механических напряжений пленок подробно описаны соответственно в работах [5, 6].

## Результаты и их обсуждение

Результаты исследований электрических и гальваномагнитных свойств пленок в зависимости от флюенсов облучения ионами Kr представлены после облучения в таблице.

Табл. Электрические и гальваномагнитные свойства пленок InSb, в зависимости от флюенсов облученных ионами Kr с энергией 145 МэВ для двух пленок, осажденных при температурах 375°C и 430°C (коэффициент Холла ( $R_H$ ), концентрация ( $n$ ) и подвижность ( $\mu$ ) носителей заряда), погрешность измерений варьировалась от 5 до 15%

Флюенс, $\text{Kr}^+ \cdot \text{см}^{-2}$	$R_H, 10^{-5}$ $\text{м}^3 \text{Кл}^{-1}$	$\mu, 10 \cdot \text{м}^2 \text{В}^{-1}$ $\text{с}^{-1}$	$n, 10^{16}$ $\text{см}^{-3}$
Исходный	5.3	7.8	9.9
Температура осаждения 375°C			
$10^{12}$	12.4	1.3	0.55
$5 \cdot 10^{12}$	6.9	0.73	0.81
$10^{13}$	7.3	1.1	0.92
Температура осаждения 430°C			
Исходный	8.4	6.9	7.3
$10^{12}$	16.4	1.4	0.39
$5 \cdot 10^{12}$	9.8	1.2	0.62
$10^{13}$	8.2	3.0	1.1

Было исследовано [6] изменение макронапряжений в гетероэпитаксиальных пленках InSb (100) на подложках GaAs в зависимости от суммарного флюенса ионов  $10^{12}$ ,  $5 \cdot 10^{12}$ . В данной работе были получены данные для флюенса  $10^{13} \text{ Кг/см}^{-2}$ . Из этих данных следует, что при флюенсе  $10^{12} \text{ см}^{-2}$  изменение макронапряжений в пленке незначительно. При флюенсах  $5 \cdot 10^{12}$  и  $10^{13} \text{ см}^{-2}$  для обеих пленок осажденных при температурах 375 и 430°C значения сжимающих макронапряжений достигает значений от (-3.3) до (-4.2) ГПа соответственно при температурах осаждения 375°C и

430°C.

На рисунках 1 (а, б) и 2 (а, б) показаны изменения постоянной Холла и подвижности электронных носителей заряда в зависимости от флюенса облучения ионами криптона гетероэпитаксиальных пленок антимонида индия, осажденных при температурах (375 и 430)°C в диапазоне воздействия температур от комнатной до 100°C.

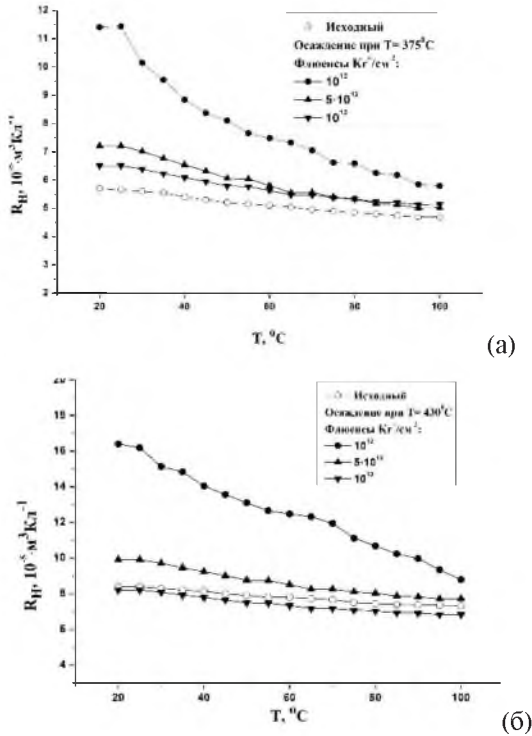


Рис. 1. Изменения постоянной Холла гетероэпитаксиальных пленок антимонида индия, осажденных при температуре 375°C (а) и 430°C (б) от флюенса облучения ионами криптона в диапазоне воздействия температур от комнатной до 100°C

Отметим, что удельное сопротивление исходной пленки при обеих температурах осаждения после облучения ионами криптона с флюенсом  $10^{12}$  см $^{-2}$  возрастает более чем в 20 раз, при увеличении флюенса до  $10^{13}$  см $^{-2}$  рост удельного сопротивления менее 10 раз.

В работе [6] с помощью моделирования в SRIM было показано, что величина ионизационных потерь превосходит величину ядерных потерь примерно в 125 раз. Следовательно, диссипация энергии ионов происходит преимущественно на элект-

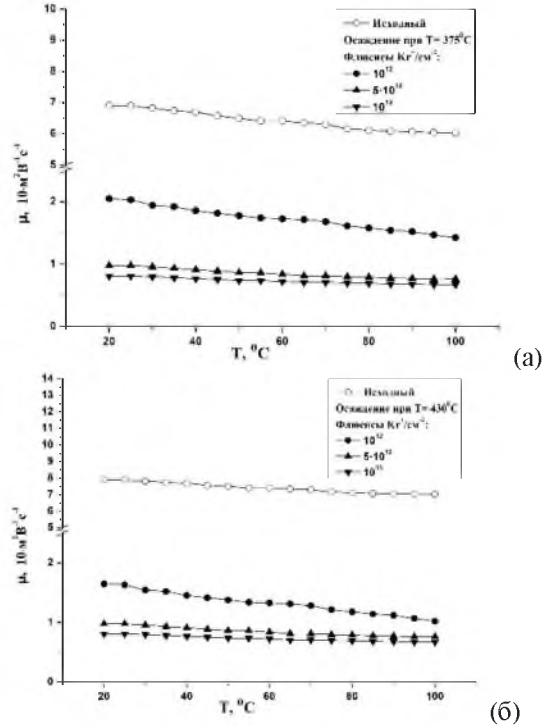


Рис. 2. Изменения подвижности ( $\mu$ ) гетероэпитаксиальных пленок антимонида индия, осажденных при температуре 375°C (а) и 430°C (б) от флюенса облучения ионами криптона в диапазоне воздействия температур от комнатной до 100°C

ронной подсистеме, из-за чего при облучении наблюдается значительный радиационный разогрев и, как следствие, интенсивное образование дефектов, плавление и сублимация материала вблизи трека. Подобное предположение подтверждается модельными расчетами в работе [7], показывающими возможность образования треков с размерами 5-8 нм.

Из совокупности представленных выше данных следует, что облучение ионами криптона с ростом флюенса уменьшает подвижность носителей, увеличивает удельное сопротивление, постоянную Холла. Максимальное изменение электрофизических параметров проявляется при флюенсе ионов криптона  $10^{12}$  см $^{-2}$ . При более высоких флюенсах облучения значения постоянной Холла близко к исходному. Также с ростом флюенса возникают сжимающие напряжения, обусловленные образованием разупорядоченных трековых областей с меньшим объемом. [6]. Предполагается, что полученные сложные зависимости из-



менения электрических и гальваномагнитных свойств с ростом флюенса облучения ионами криптона возможно можно пояснить на основании модели «амфотерных» дефектов. Т.е. акцепторный или донорный тип доминирующих дефектов, создаваемых облучением определяется положением уровня «дефектного» уровня Ферми относительно исходного положения уровня Ферми [8]. Известно, что в InSb вакансии сурьмы действуют как донор, а вакансии индия действуют как акцептор. Предполагается, что при облучении ионами криптона флюенсом  $10^{12}$  ион/см<sup>-2</sup> в пленке формируются дефекты акцепторного типа (вакансии индия), при этом не возникают сжимающие напряжения, плотность разупорядоченных областей невелика. Увеличение флюенса приводит к уменьшению доминирования дефектов акцепторного типа за счет увеличения концентрации дефектов донорного типа сопровождающимся ростом количества трековых разупорядоченных областей.

### Заключение

Установлено, что при увеличении значения флюенсов облучения ионами криптона с энергией 145 МэВ уменьшается подвижность носителей, значительно увеличивается удельное сопротивление и постоянная Холла. Максимальное изменение электрофизических параметров пленки проявляется при флюенсе ионов криптона  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>. При более высоких флюенсах облучения значение постоянной Холла близко к исходному. Предполагается, что динамика создания дефектов акцепторного и донорного типа при флюенсе  $10^{12}$  см<sup>-2</sup> смещена в сторону создания значительной концентрации дефектов акцепторного типа. Увеличение флюенса приводит к уменьшению доминирования дефектов акцепторного типа за счет увеличения концентрации дефектов донорного типа, сопровождающимся ростом количества трековых разупорядоченных областей.

Исследование выполнено в рамках финансирования государственного научного

задания Республики Беларусь «Радиационно-стойкие гетероэпитаксиальные структуры антимонида индия на подложках арсенида галлия» (1.3.2).

### Библиографические ссылки

1. Каменская И.В. Электрофизические и тензо-электрические свойства InSb и GaSb, облученных электронами, протонами и нейтронами: автореф. дис. к. ф.-м. н. Сибирский физико-технический институт; Томский государственный педагогический университет. Томск, 2007. 23 с.
2. Колесникова Е.А., Углов В.В., Кулешов А.К., Русальский Д.П., Гуринович В.А. Радиационная стабильность датчиков, изготовленных на основе n-InSb-i-GaAs, В кн.: Анищик В.М., ред. Материалы Взаимодействие излучений с твердым телом, материалы 14-ой Международной конференции БГУ, (21-24 сентября 2021 г.) Минск; Минск: БГУ; 2021. С. 530-533.
3. Вигдорович Е.Н. Радиационная стойкость эпитаксиальных структур на основе GaAs *Российский технологический журнал* 2019; 7(3): 41-48.
4. Кулешов, А.К., Углов В.В., Русальский Д.П. Электрические свойства и механические напряжения в гетероэпитаксиальных пленках интимонида индия, облученных протонами с энергией 1,5 МэВ. В кн. редкол.: В.Б. Оджаяев (гл. ред.) [и др.]. Материалы и структуры современной электроники: матер. XI Междунар. науч. конф., Минск, (16–18 окт. 2024 г.); Минск: БГУ, 2024. С. 283-286.
5. 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.
6. Uglov V.V., Kuleshov A.K., Zlotsky S.V., Rusalsky D.P., Mihasev R.N. Structural changes in heteroepitaxial InSb films after impact to high-energy Kr ions *Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024)*; Tomsk, Russia, P. 1327-1331.
7. Teterukov E.V., Uglov V.V., Kuleshov A.K., Kolesnikova E.A., Rusalsky D.P. Modeling of temperature fields and track formation in indium antimonide during irradiation with high-energy krypton ions. *Proceedings of the 15th International Conference Minsk, Belarus, (September 26-29, 2023)*; Print in Minsk (ISSN 2663-9939): P.136-138.
8. 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): 179-182.