

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК АНТИМОНИДА ИНДИЯ ОБЛУЧЕННЫХ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 1,5 МэВ

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Определены электрические свойства гетероэпитаксиальных пленок InSb на подложках GaAs облученных протонами с энергией 1,5 МэВ с флюенсами $5 \cdot 10^{14} \text{ Н}^+/\text{см}^2$ и $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+/\text{см}^2$. Установлена радиационная стабильность электрических свойств пленок при облучении флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ Н}^+/\text{см}^2$. При увеличении флюенса до $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+/\text{см}^2$ происходит увеличение сопротивления пленки в 6 раз, постоянная и потенциал Холла, чувствительность к магнитному полю увеличиваются в 1,5-1,7 раза, подвижность носителей уменьшается до 10 раз. Рассчитанная плотность вакансий в пленке достигает значений 10^{20} см^{-3} , что определяет выявленные изменения электрических свойств пленок InSb при облучении флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ Н}^+/\text{см}^2$.

Важное практическое применение в твердотельной микроэлектронике, использование в космической индустрии имеет узкозонный полупроводник группы АЗВ5 – антимонид индия. Это обусловлено рекордно высокой подвижностью электронов по отношению к другим полупроводниковым соединениям. Свойства осаждаемых гетероэпитаксиальных пленочных структур антимонида индия на подложках арсенида галлия подобны монокристаллическим структурам и стабильны при низких температурах космического пространства. Такие пленки применяются в микроэлектронных датчиках измерения магнитного поля, тока, угла поворота и других физических величин. Высокоэнергетические частицы космоса (протоны, электроны, ионы) и их взаимодействие с материалами полупроводниковых приборов вызывает множество радиационных эффектов и изменения их свойств. Для успешного применения приборов в космосе необходима их радиационная устойчивость не менее 5 лет. В пределах радиационных поясов Земли воздействие протонного облучения составляет наибольшую долю, энергия протонного облучения находится в интервале 0,5-10 МэВ.

В связи с этим актуальной является цель работы по установлению закономерностей изменения электрических свойств, в гетероэпитаксиальных пленках антимонида индия, температурного воздействия в зависимости от облучения протонов с энергией 1,5 МэВ и флюенсами имитирующих длительное воздействие протонов на околоземной орбите, а также сопоставление изменения электрических свойств с расчетными значениями радиационных повреждений (сна) и концентраций образующихся вакансий в пленке InSb, с использованием программы SRIM.

Для имитации воздействия космического протонного облучения в течении не менее 5 лет были рассчитаны флюенсы протонов $5 \cdot 10^{14} \text{ Н}^+/\text{см}^2$ и $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+/\text{см}^2$ с энергией 1,5 МэВ на основе литературных данных о значении плотности потока протонов на околоземной орбите составляет $(3 \cdot 10^{11} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1})$ [1]. Поглощенные дозы пленкой InSb рассчитывались с использованием программы SRIM, в соответствии с флюенсами они составили $3,2 \cdot 10^4 \text{ Гр}$ и $3,2 \cdot 10^5 \text{ Гр}$.

Были сделаны оценки радиационных повреждений и концентрации вакансий созданных протонами с энергией 1,5 МэВ в антимониде индия для флюенсов протонов $5 \cdot 10^{14} \text{ Н}^+/\text{см}^2$ и $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+/\text{см}^2$ с использованием программы SRIM и литературных данных энергий смещения атомов In и Sb. Установлено, что под действием протонного воздействия с энергией 1,5 МэВ в пленке антимонида толщиной 2 мкм 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: $(0,02 \text{ и } 0,2) \cdot 10^{-2}$ сна; концентрации вакансий $(0,05 \text{ и } 0,54) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Объектом экспериментальных исследований были гетероэпитаксиальные пленки антимонида индия, осажденные на полированные пластины i-GaAs (100) методом взрывного термического испарения, с толщиной 2 мкм. Описание метода, условия осаждения пленок, структура и методики измерения их электрических свойств пленок представлены в работе

[2]. 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. Значение тока пучка протонов определялось в ходе предварительных экспериментов с целью нагрева столика с образцами не более 60° С при используемых в работе флюенсах протонов.

Далее представлены результаты измерения электрических свойств эпитаксиальных пленок антимонида индия на подложках арсенида галлия до и после облучения протонами с энергией 1,5 МэВ и флюенсами протонов $5 \cdot 10^{14}$ Н⁺/см² и $5 \cdot 10^{15}$ Н⁺/см² (Таблица 1).

Таблица 1 – Электрические свойства (холловское напряжение - U_x ; постоянная Холла - R_x ; чувствительность холловского напряжения к магнитному полю - γ , концентрация - n и подвижность носителей заряда - μ) эпитаксиальных пленок антимонида индия на подложках арсенида галлия, в зависимости от флюенса протонов $5 \cdot 10^{14}$ Н⁺/см² и $5 \cdot 10^{15}$ Н⁺/см² с энергией 1,5 МэВ. Относительная точность представленных в таблице значений входит в интервал 4÷7%.

Флюенс Н ⁺ /см ²	U_x , (10 ⁻³ В)	R_x , (10 ⁻⁵ м ³ Кл ⁻¹)	γ , мВ·Тл ⁻¹	n , (10 ¹⁷ ·см ⁻³)	μ , м ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹
исходный	49,4	2,03	11,1	3,08	1,48
$5 \cdot 10^{14}$	52,1	2,20	11,8	2,90	1,54
$5 \cdot 10^{15}$	74,0	3,50	19,1	1,80	0,15

На рисунке 1 (а) представлены изменения сопротивления (R) и Холловского потенциала (U_H) (рисунок 1 (б)) гетероэпитаксиальных пленок антимонида индия на подложках арсенида галлия до и после облучения протонами с энергией 1,5 МэВ в зависимости от флюенса $5 \cdot 10^{14}$ Н⁺/см² и $5 \cdot 10^{15}$ Н⁺/см² в зависимости от температурного воздействия на воздухе в интервале температур 25–120 °С.

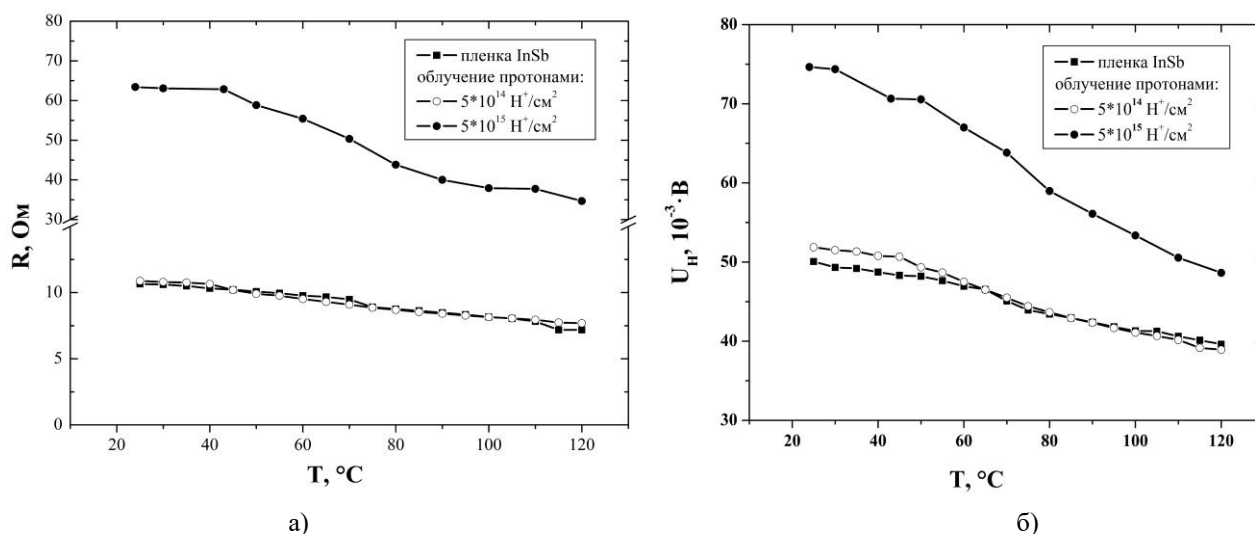


Рисунок 1 – Сопротивление (R) – (а) и Холловский потенциала (U_x) – (б) гетероэпитаксиальных пленок InSb до и после облучения протонами с энергией 1,5 МэВ с флюенсами $5 \cdot 10^{14}$ и $5 \cdot 10^{15}$ Н⁺/см² в зависимости от температуры нагрева на воздухе в интервале температур 25–120 °С.

Как следует из представленных данных облучение гетероэпитаксиальных пленок антимонида индия на подложках арсенида галлия протонами с энергией 1,5 МэВ и флюенсе $5 \cdot 10^{14}$ Н⁺/см², соответствующей поглощенной дозе $3,2 \cdot 10^6$ рад не приводит к изменению электрических свойств, потенциала Холла, чувствительности к магнитному полю, концентрации и подвижности носителей. Изменение электрических свойств облученных пленок в зависимости от температурного воздействия на воздухе в интервале температур 25–120 °С аналогично необлученному образцу. Такую радиационную стабильность электрических свойств проявляют гетероэпитаксиальные пленки InSb под действием облучения высокоэнергетическими электронами и гамма-квантами при поглощенной дозе $5 \cdot 10^5$ рад [3,4].

При увеличении флюенса протонов до $5 \cdot 10^{15}$ Н⁺/см² (поглощенная доза $3,2 \cdot 10^5$ Гр) происходит увеличение сопротивления пленки в 6 раз, постоянная и потенциал Холла, чувстви-

тельность к магнитному полю увеличиваются в 1,5-1,7 раза, подвижность носителей уменьшается до 10 раз. Температурное воздействие до 120° С приводит к уменьшению сопротивления и потенциала Холла, относительное уменьшение электрических свойств находится в интервале 1,4-1,5 раза. Для исходных и облученных малой дозой протонов образцов относительное уменьшение электрических свойств при температурном воздействии составляет близкие величины 1,3-1,4 раза. Если сопоставить эти экспериментальные данные с результатами расчетов радиационных повреждений и концентрации вакансий представленных выше, то основной причиной наблюдаемого изменения электрических свойств пленок InSb под действием флюенса протонов $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+/\text{см}^2$ является, накопление радиационных дефектов, которые устойчивы к отжигу до температуры 120° С. Отметим, что изменение сопротивления, постоянной Холла исследованных пленок InSb под действием протонов с флюенсами $5 \cdot 10^{14} \text{ Н}^+/\text{см}^2$ и $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+/\text{см}^2$ значительно меньше, чем рост сопротивления и постоянной Холла монокристаллических пластинок InSb облученных протонами с энергией 10 Мэв и подобными флюенсами [5]. Предполагается, что более высокая радиационная стабильность электрических свойств гетероэпитаксиальных пленок InSb по отношению к монокристаллам обусловлена более высокой плотностью стоков и ловушек дефектов, генерируемых при облучении.

Авторы работы выражают благодарность за проведение экспериментов по облучению протонами Горлачеву И.В. – к. физ.-мат. наук, начальнику аналитической группы ускорителя тяжёлых ионов УКП-2-1, Института ядерной физики, г. Алматы, Казахстан.

Список литературы

1. Безродных И. П., Тютнев А. П., Семёнов В. Т. Радиационные эффекты в космосе. Часть 3. Влияние ионизирующего излучения на изделия электронной техники. - М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 64 с.
2. 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 (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes), V. 25, Iss. 1, p. 71-80, 2021.
3. 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 // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 14-ой Международной конференции / БГУ. – Минск, 2021. – с. 530–533.
4. Углов, В. В., Колесникова, Е. А., Кулешов, А. К., Русальский, Д. П., Тетеруков, Е. В. Влияние облучения электронами на электрические свойства гетероэпитаксиальных структур n-InSb-i-GaAs // Четырнадцатый Международный Уральский Семинар «Радиационная физика металлов и сплавов» : тезисы докладов, Кыштым, 25–29 апреля 2022 г. – Кыштым, 2022. – С. 81.
5. Каменская И. В. 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.