

УДК 621.315.592.3

UDC 621.315.592.3

ЛЕГИРОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $Ga_xIn_{(1-x)}P_ySb_{(1-y)}$ ПРИМЕСЬЮ ТЕЛЛУРА**TELLURIUM DOPING OF EPITAXIAL LAYERS $Ga_xIn_{(1-x)}P_ySb_{(1-y)}$**

Тумаев Евгений Николаевич
д. ф.-м. н., профессор

Tumaev Eugeniy Nikolaevich
Dr.Sci.Phys.-Math., professor

Скачков Александр Федорович
аспирант
*Кубанский государственный университет,
Краснодар, Россия*

Skachkov Alexander Fedorovich
postgraduate student
Kuban State University, Krasnodar, Russia

В статье приведены результаты исследования влияния примеси теллура на оптико-электрические свойства эпитаксиальных слоев $Ga_xIn_{(1-x)}P_ySb_{(1-y)}$. Обсуждаются наиболее важные результаты

The results of the research of the influence of tellurium dopant on the opto-electrical properties of the $Ga_xIn_{(1-x)}P_ySb_{(1-y)}$, are reviewed in this article. The mostly important results are discussed

Ключевые слова: СОЕДИНЕНИЯ A_3B_5 , ЭПИТАКСИЯ, ЛЕГИРОВАНИЕ, ПОЛУПРОВОДНИК

Keywords: COMPOUNDS A_3B_5 , EPITAXY, DOPING, SEMICONDUCTOR

Введение

Влияние различных параметров роста на упорядочение и ширину запрещенной зоны GaInP хорошо изучены. Ширина запрещенной зоны GaInP зависит не только от температуры роста, но и от скорости роста, парциального давления PH_3 , разориентации подложки от (100), а также уровня легирования. Хотя процесс формирования эпитаксиального слоя GaInP является очень сложным и трудно прогнозируемым, существует несколько характеристик, которые можно выделить. Например, на подложках, которые имеют малую разориентацию относительно (100), ширина запрещенной зоны GaInP при неизменных иных параметрах роста будет ближе к 1,8 эВ, чем 1,9 эВ. Используя экстремальные значения скорости роста, температуры или парциального давления фосфина, можно добиться приближения ширины запрещенной зоны GaInP к 1,9 эВ [1]. Однако при этом, как правило, наблюдается ухудшение других параметров материала, например, диффузионной длины неосновных носителей заряда, морфологии слоя, состава и т. д.

Соединение A_3B_5 $Ga_xIn_{(1-x)}P_ySb_{(1-y)}$ является перспективным

материалом для применения в современных полупроводниковых приборах, обеспечивающим возможность вариации ширины запрещенной зоны от 1.8 до 1.9 эВ. Примесь сурьмы по отношению к GaInP является изовалентной, т. е. не образует заряженных центров, в тоже время малое добавление сурьмы приводит к снижению сверхструктурного упорядочения в подрешетке III-ей группы, вызывая увеличение ширины запрещенной зоны основного материала GaInP [2].

Легирующие примеси n-типа для соединения $Ga_xIn_{(1-x)}P_ySb_{(1-y)}$

Наибольшее распространение в качестве донорной примеси соединений A_3B_5 в технологии МОС-гидридной эпитаксии получил Si, как наиболее дешевый и простой в применении. Однако существует ряд недостатков данной легирующей примеси, основным из которых является ограничение в достижении высокого уровня концентрации носителей зарядов. В качестве прекурсора кремния используется моносилан, степень разложения на основные компоненты которого напрямую зависит от температуры в реакторной камере. В связи с этим для достижения высоких уровней легирования необходимо увеличивать температуру роста отдельных слоев, что приводит к увеличению диффузии между эпитаксиальными слоями, снижая качество отдельных гетеропереходов и готового прибора. Также для Si характерна самокомпенсация свободных носителей при достижении уровней легирования выше $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что приводит к необходимости поиска альтернативных источников донорной примеси, обеспечивающих возможность получения уровня концентрации носителей зарядов свыше $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, сочетающегося с высокой подвижностью носителей.

Таким источником может являться примесь теллура, которая активно применяется для легирования соединений на основе арсенида галлия. В кристаллическую решетку данных соединений теллур встраивается на место арсеникума, позволяя производить подстройку необходимого уровня

легирования изменяя соотношение прекурсоров третьей и пятой группы. Прекурсором примеси теллура является диэтилтеллур, для разложения которого не требуются критические температуры, что позволяет в соединениях на основе арсенида галлия получать высокий уровень легирования более $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при невысокой температуре роста эпитаксиальных слоев. Также теллур обладает более низким коэффициентом диффузии, чем кремний при температурах характерных для эпитаксиального роста (при 600°C Te: $D \sim 3 \cdot 10^{-23} \text{ см}^2/\text{с}$, Si: $2 \cdot 10^{-16} < D < 2 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2/\text{с}$, в зависимости от уровня легирования) [3].

Физические и химические свойства DETe делают его привлекательным источником теллура. Диэтилтеллур остается в жидком состоянии до 136°C , слабо взаимодействует с кислородом и водой. DETe может применяться как МОС-гидридной эпитаксии, так и в молекулярно-лучевой эпитаксии.

В настоящей работе приведены результаты исследования легирования эпитаксиальных слоев $\text{Ga}_x\text{In}_{(1-x)}\text{P}_y\text{Sb}_{(1-y)}$ примесью теллура при различных соотношениях пятой и третьей группы, исследовано влияние сурьмы на вхождение теллура в кристаллическую решетку эпитаксиального слоя $\text{Ga}_x\text{In}_{(1-x)}\text{P}_y\text{Sb}_{(1-y)}$.

Соединение $\text{Ga}_x\text{In}_{(1-x)}\text{P}_y\text{Sb}_{(1-y)}$, легированное примесью теллура

Исследуемые образцы эпитаксиальных слоев $\text{Ga}_x\text{In}_{(1-x)}\text{P}_y\text{Sb}_{(1-y)}$, легированных теллуrom были получены методом МОС-гидридной эпитаксии в горизонтальном индуктивно нагреваемом реакторе при давлении 75 мбар. В качестве источников третьей группы использовались TMGa и TMIIn, в качестве источника пятой группы использовался PH_3 . Источниками легирующих примесей являлись TMSb и DETe. Эпитаксиальный рост осуществлялся на полуизолирующих подложках GaAs (100) диаметром 100 мм, разориентированные на 6° в сторону $\langle 111 \rangle$. В рамках исследования особенностей вхождения теллура в эпитаксиальные

слои $\text{Ga}_x\text{In}_{(1-x)}\text{P}_y\text{Sb}_{(1-y)}$, было проведено несколько серий ростовых процессов.

На первом этапе были выращены эпитаксиальные слои GaInP, не содержащие сурьмы (при $y = 1$), с разной концентрацией теллура, при следующих соотношениях мольных потоков DETe и третьей группы DETe/III: $7,96 \cdot 10^{-3}$, $1,59 \cdot 10^{-2}$, $1,99 \cdot 10^{-2}$, $2,98 \cdot 10^{-2}$, $3,98 \cdot 10^{-2}$. Состав твердой фазы GaInP был подобран таким образом, чтобы постоянные кристаллических решеток подложки арсенида галлия и эпитаксиального слоя GaInP были согласованы между собой. Предполагая, что теллур также встраивается в подрешетку пятой группы, аналогично соединению GaAs, данная серия ростовых процессов была выращена повторно при меньшем потоке фосфина. Поток фосфина был уменьшен в два раза по сравнению с предыдущей серией.

На третьем этапе для определения влияния изовалентной примеси сурьмы на вхождение теллура в твердую фазу растущего эпитаксиального слоя $\text{Ga}_x\text{In}_{(1-x)}\text{P}_y\text{Sb}_{(1-y)}$, были выращены на подложках GaAs слои $\text{GaInP}_y\text{Sb}_{(1-y)}$ с малым содержанием сурьмы (при $y = 0,998$). Соотношения мольных потоков DETe и третьей группы были аналогичны серии без сурьмы.

Эпитаксиальные слои GaInP:Te, выращенные без сурьмы, обладали хорошей морфологией и «зеркальностью» поверхности во всем диапазоне изменения потока DETe. Для слоев $\text{GaInP}_{0,998}\text{Sb}_{0,002}:\text{Te}$ при малом соотношении потоков DETe и III-ей группы $7,96 \cdot 10^{-3}$ наблюдалось ухудшение морфологии. Дальнейшее снижение DETe/III приводило к «матовению» растущего слоя $\text{GaInP}_{0,998}\text{Sb}_{0,002}:\text{Te}$. Из эпитаксиальных структур были изготовлены образцы площадью 1 см^2 . Методом ван дер Пау были измерены основные электрические параметры полупроводниковых эпитаксиальных слоев $\text{GaInP}_y\text{Sb}_{(1-y)}:\text{Te}$: удельное сопротивление, тип легирования, концентрация основных носителей, подвижность основных носителей зарядов.

На рисунке 1 представлена зависимость концентрации свободных носителей зарядов от соотношения потоков DETe и третьей группы, для измеренных образцов.

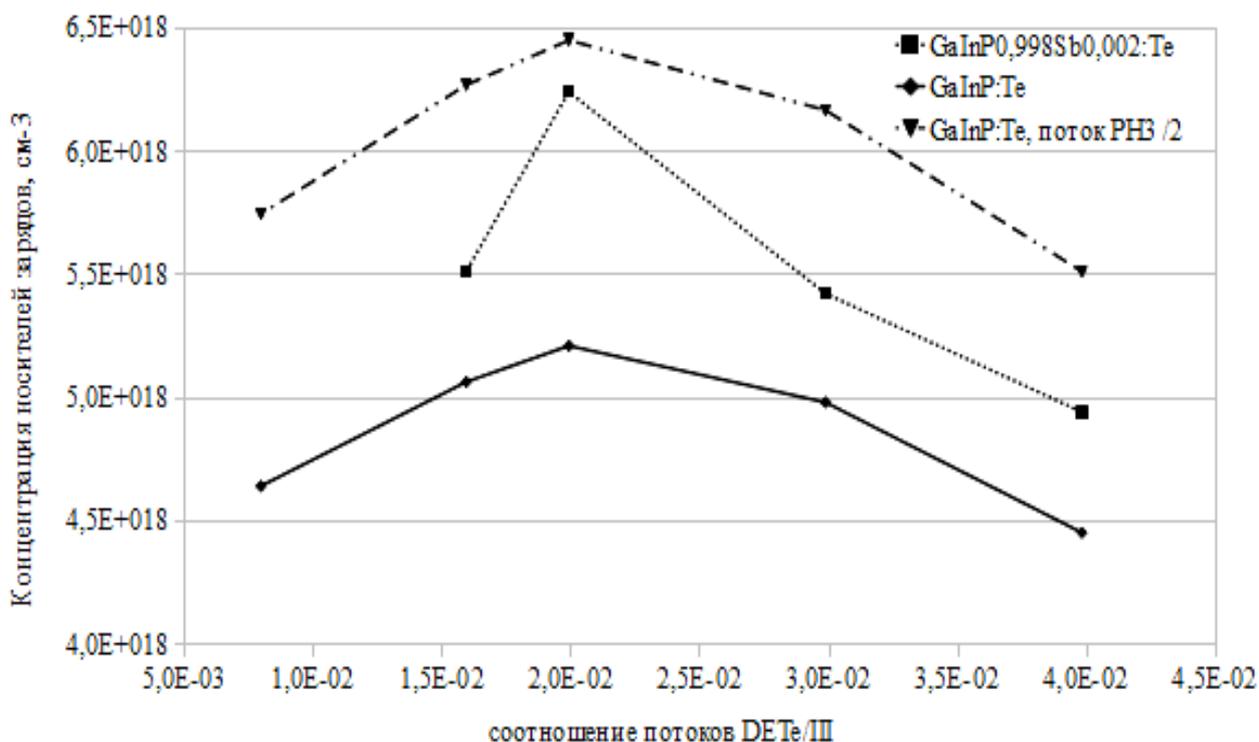


Рисунок 1. Зависимость уровня легирования GaInP_ySb_(1-y):Te от соотношения потоков DETe и III-ей группы

Из рисунка 1 видно, что увеличение потока DETe в реактор до соотношения DETe/III $1,99 \cdot 10^{-2}$ приводило к увеличению концентрации носителей зарядов как для образцов с сурьмой, так и без сурьмы. Последующее увеличение потока DETe вызывало самокомпенсацию свободных носителей зарядов, на что указывает снижение уровня легирования слоев GaInP_ySb_(1-y):Te. Также увеличение уровня легирования при уменьшении потока фосфина свидетельствует о том, что теллур встраивается в подрешетку пятой группы и существует возможность регулировки концентрации носителей зарядов не только с помощью потока DETe, но и изменением потока фосфина. Однако такой способ регулировки

уровня легирования также будет оказывать влияние на упорядочение атомов кристаллической решетки и ширину запрещенной зоны основного материала GaInP. Добавление сурьмы в эпитаксиальные слои привело к увеличению уровня легирования. Данный эффект может вызван тем, что при снижении упорядоченности атомов кристаллической решетки основного материала GaInP, за счет встраивания сурьмы, увеличивается эффективность вхождения теллура в эпитаксиальный слой.

На рисунке 2 приведена зависимость подвижности носителей зарядов от соотношения потоков DE_{Te} и III-ей группы.

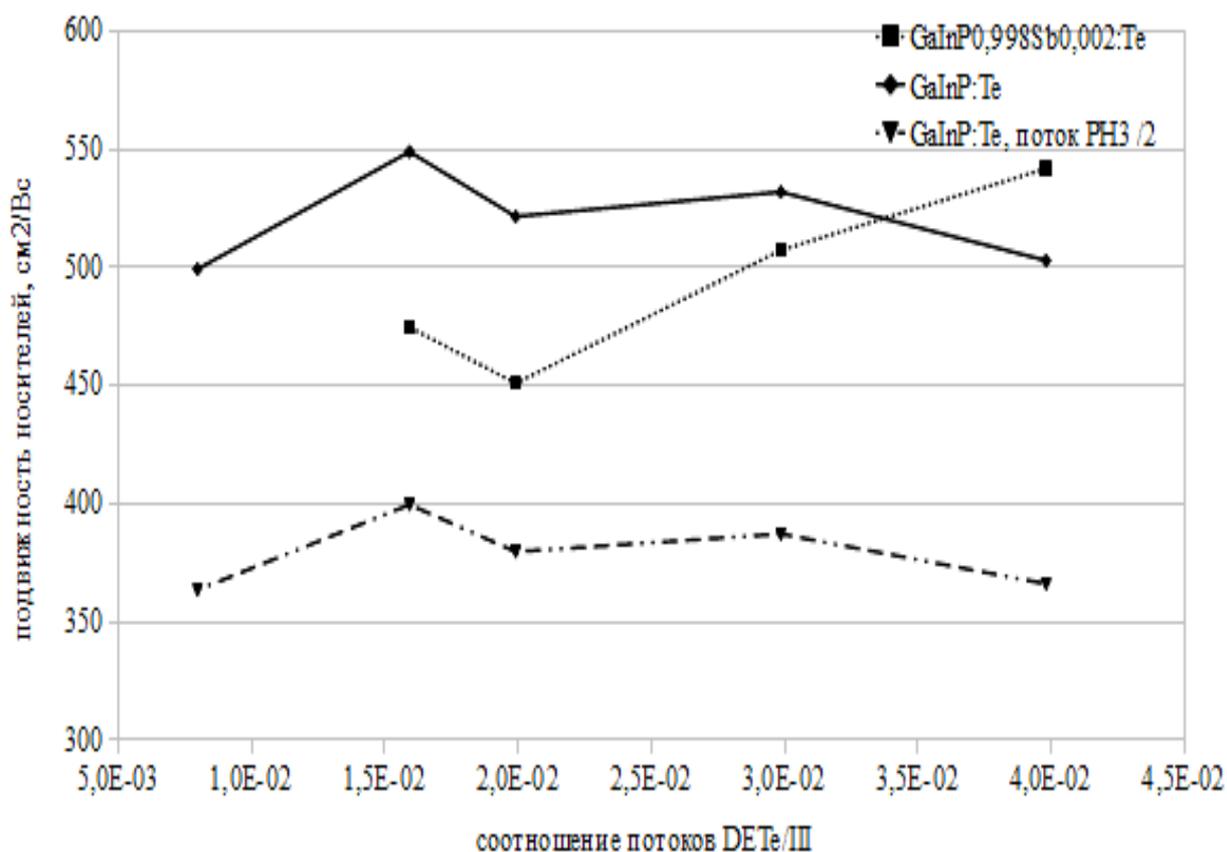


Рисунок 2. Подвижность свободных носителей зарядов при температуре 300 К.

Тенденция изменения подвижности носителей зарядов при

изменении уровня легирования эпитаксиальных слоев $\text{GaInP}_y\text{Sb}_{(1-y)}\text{:Te}$ является схожей для всех образцов. Наиболее высокая подвижность наблюдалась в слоях $\text{GaInP}\text{:Te}$ с нормальным потоком фосфина, которые обладали наименьшими уровнями концентрации носителей зарядов. Отдельного внимания заслуживают образцы с наибольшей концентрацией свободных носителей зарядов, полученных при добавлении сурьмы. Разница в максимальном достигнутом уровне легирования образцов эпитаксиальных слоев GaInP с сурьмой и образцов, в процессе роста которых был уменьшен поток фосфина в 2 раза, составила менее 4%, в то время как подвижность носителей зарядов в эпитаксиальных слоях $\text{GaInP}_{0,998}\text{Sb}_{0,002}\text{:Te}$ с наибольшим уровнем легирования превышал подвижность в слоях $\text{GaInP}\text{:Te}$ с уменьшенным потоком фосфина, также с наибольшим уровнем легирования, более, чем на 18%. Так как подвижность носителей зарядов является одним из важнейших параметров полупроводниковых структур, то использование сурьмы, для повышения коэффициента вхождения теллура в эпитаксиальные слои GaInP , является наиболее приемлемым способом.

Влияние Te на упорядочение атомов кристаллической решетки GaInP

Условия эпитаксиального роста оказывают сильное влияние на упорядочение атомов кристаллической решетки GaInP , от которой напрямую зависит значение ширины запрещенной зоны материала. В процессе легирования GaInP теллуrom, примесные атомы Te встраиваются в подрешетку пятой группы. Данный процесс также может оказывать влияние на упорядочение атомов в кристаллической решетке растущего эпитаксиального слоя.

Для определения влияния примеси теллура на упорядочение атомов кристаллической решетки GaInP были проведены измерения длин волн пиков фотолюминесценции, по которым были определены значения ширины запрещенной зоны материала. Измерения проводились образцов

нелегированных сурьмой. В качестве реферного образца был выращен нелегированный эпитаксиальный слой GaInP аналогичного состава на подложке GaAs.

На рисунке 3 приведена зависимость значения ширины запрещенной зоны от соотношения потоков DETe и III-ей группы.

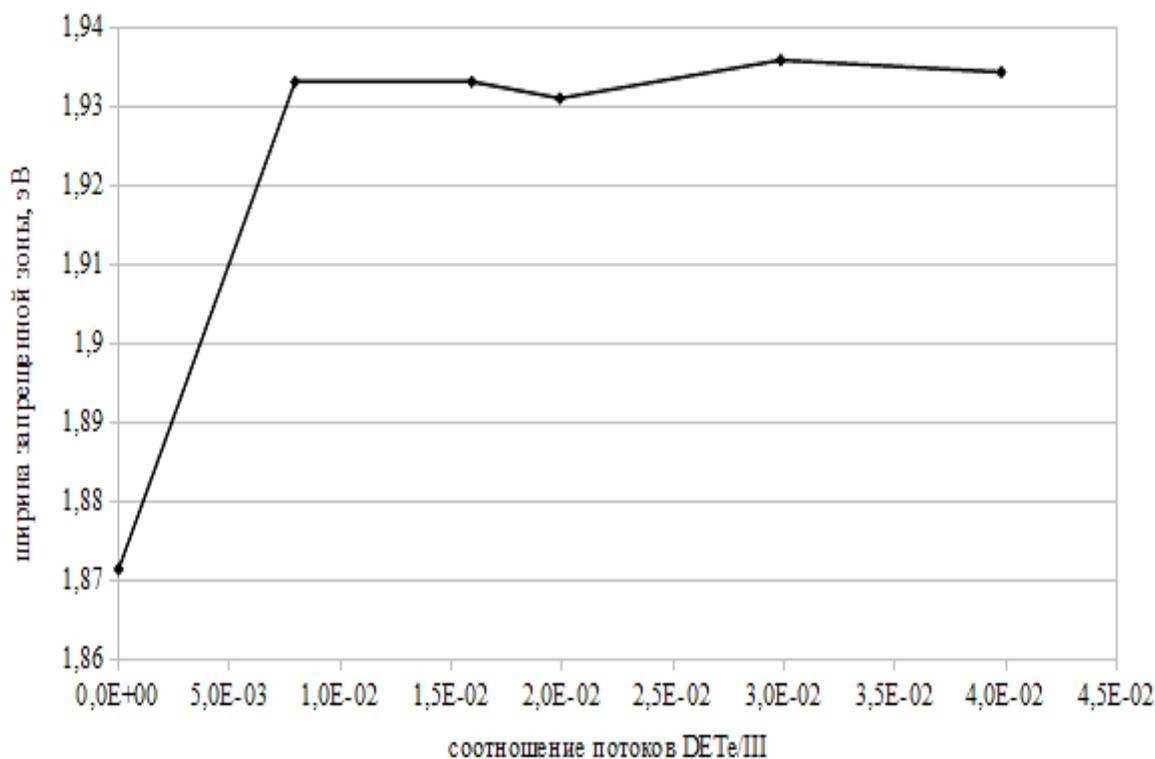


Рисунок 3. Зависимость значения ширины запрещенной зоны слоев GaInP:Te от соотношения потоков DETe/III

Из приведенных данных видно, что вхождение примеси теллура снижает сверхструктурное упорядочение атомов кристаллической решетки эпитаксиального слоя GaInP:Te, что приводит к увеличению ширины запрещенной зоны легированного материала. Дальнейшее увеличение концентрации примеси Te не вызывало дальнейшего увеличения ширины запрещенной зоны.

Эффект снятия сверхструктурного упорядочения GaInP, при

легировании теллуром, может быть использован в полупроводниковых приборах, в которых необходимо применение широкозонных материалов n-типа.

Заключение

В настоящей работе было проведено исследования влияния примеси теллура на оптико-электрические свойства слоев $\text{GaInP}_y\text{Sb}_{(1-y)}$, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии. Была получена зависимость концентрации свободных носителей зарядов и их подвижности от соотношения потоков прекурсора DEТе и III-группы. Определено влияние примеси теллура на ширину запрещенной зоны эпитаксиальных слоев GaInP.

Список литературы

- [1] Olson J. M., Friedman D. J. High-Efficiency III-V Multijunction Solar Cells // Physics of III-V solar cells. 2003. P.359-411.
- [2] Patent Pub. No.: US.2007.0068572 A1. Isoelectronic surfactant induced sublattice disordering in optoelectronic devices.
- [3] Kamp M. Morsch G. Te doping of GaAs using diethyl-tellurium // Appl. Phys. 1994. 76(3). P.1974-1976.

References

- [1] Olson J. M., Friedman D. J. High-Efficiency III-V Multijunction Solar Cells // Physics of III-V solar cells. 2003. P.359-411.
- [2] Patent Pub. No.: US.2007.0068572 A1. Isoelectronic surfactant induced sublattice disordering in optoelectronic devices.
- [3] Kamp M. Morsch G. Te doping of GaAs using diethyl-tellurium // Appl. Phys. 1994. 76(3). P.1974-1976.