

Процесс десорбции оксида с поверхности InSb в потоке сурьмы

© М.А. Суханов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

E-mail: msukhanov@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 10 февраля 2023 г.

В окончательной редакции 30 марта 2023 г.

Принята к публикации 10 апреля 2023 г.

In situ методом дифракции быстрых электронов исследован процесс удаления оксида с поверхности InSb (001) в вакууме и в потоке сурьмы. Получена зависимость толщины оксида от температуры отжига. Обнаружено, что поток сурьмы замедляет процесс удаления оксида за счет обратной реакции образования оксида. Процесс разложения и удаления оксида в вакууме и в потоке сурьмы описан системой кинетических уравнений, определена энергия разложения оксида сурьмы.

Ключевые слова: InSb, оксид, энергия активации, десорбция.

DOI: 10.21883/FTP.2023.03.55625.4580

1. Введение

Одной из самых перспективных наукоемких технологий XXI века является тепловидение. Основой тепловизионных устройств являются матричные фотоприемные устройства ИК диапазона, формирующие изображение. Для создания матричных фотоприемников среднего ИК диапазона (3–5 мкм) широко применяются полупроводниковые гетероструктуры на основе InSb [1–3], которые обычно выращиваются на подложках InSb. Перед эпитаксиальным наращиванием подложки очищают и удаляют слой оксида с поверхности, иначе его остатки приводят к формированию дефектов на границе слоя и подложки [4]. Применяют несколько способов удаления оксидов с поверхности InSb: обработка поверхности в различных растворах [5,6], термический отжиг, экспозиция поверхности в потоке молекулярного или атомарного водорода [7], удаление оксида с помощью бомбардировки ионами [8]. Экспозиция в потоке водорода и сурьмы позволяет получить гладкую морфологию поверхности подложки ($R_{ms} = 0.15$ нм) [9], однако требует дополнительного оборудования. Наиболее часто используемый способ удаления оксида — термический отжиг в ростовой камере. Выбор условий термического удаления оксида осложняется тем, что десорбция оксидов сурьмы и индия с поверхности происходит при температурах, близких к температуре неконгруэнтного испарения InSb, поэтому существует вероятность деградации поверхности подложки [10]. Термический отжиг без потока сурьмы приводит к ухудшению морфологии поверхности, формированию островков InSb, фасетированию поверхности, деградации подложки и образованию островков индия [11].

Процесс десорбции оксида в вакууме можно контролировать с помощью дифракции быстрых электронов (ДБЭ). В работе [11] было выделено несколько этапов удаления оксида. В начале отжига в картине ДБЭ наблюдается фон с дифракционными кольцами, далее,

по мере нагрева происходит десорбция оксидов сурьмы, возникают рефлексы, возможно, соответствующие дифракции в слое In_2O_3 . В работе [12] также выделили два этапа десорбции. Первый этап — десорбция оксидов сурьмы с образованием дополнительных дифракционных рефлексов, связываемых с оксидами индия, и второй этап при более высоких температурах — десорбция оксидов индия. На втором этапе интенсивность рефлексов оксида индия уменьшается и на поверхности InSb формируется реконструкция (1×3). Только в работе [12] получена энергия активации 3.7 эВ процесса удаления оксида в вакууме при постоянной температуре подложки, рассчитанная из времени, которое необходимо для получения картины дифракции без дополнительных рефлексов, связанных с оксидами. Полученная энергия активации, по-видимому, равна сумме энергий активации процессов удаления оксидов сурьмы и оксидов индия. Влияние потока сурьмы на процесс удаления оксида до сих пор не изучено.

Цель данной работы — *in situ* изучение процесса термической десорбции оксидов с поверхности InSb в вакууме и в потоке сурьмы, определение влияния потока сурьмы на скорость и энергию активации процесса разложения оксида.

2. Методика эксперимента

Удаление оксида с epi-ready подложек InSb (001) производилось путем термического отжига в ростовой камере установки молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) Compact-21T (Riber). Перед загрузкой в ростовую камеру подложка отжигалась в буферной вакуумной камере при температуре $T = 175^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. В ростовой камере нагрев подложки от комнатной температуры до $T = 370^\circ\text{C}$ осуществлялся со скоростью $10^\circ\text{C}/\text{мин}$, далее до $T = 400^\circ\text{C}$ со скоростью $5^\circ\text{C}/\text{мин}$. При температуре $T = 400^\circ\text{C}$ образец

выдерживался 10 мин для стабилизации температуры. Дальнейший нагрев образца осуществлялся со скоростью $5^\circ\text{C}/\text{мин}$ до 450°C . Затем образец выдерживался при постоянной температуре 450°C . Контроль температуры подложки осуществлялся с помощью термопары. Предварительно температура термопары была откалибрована по известной температуре реконструкционного перехода $(1 \times 3) \rightarrow c(4 \times 4)$ на поверхности InSb [13]. В качестве источника сурьмы использовался вентильный источник с зоной крекинга. При выбранной температуре зоны крекинга (800°C) поток сурьмы состоял из смеси атомов Sb и димеров Sb_2 [14]. Предварительно поток сурьмы из источника измерялся с помощью ионизационного вакуумметра, помещенного непосредственно перед подложкой, и составлял $3.3 \cdot 10^{-6}$ Торр, что эквивалентно потоку $2 \cdot 10^{14}$ ат · см $^{-2}$ · с $^{-1}$ [15]. Поток сурьмы подавался на поверхность при температуре $\sim 422.5^\circ\text{C}$. Процесс десорбции оксида контролировался *in situ* с помощью дифракции быстрых электронов. Угол падения пучка электронов составлял 3° , энергия 12 кэВ. Для записи и обработки картины ДБЭ использовалась система KSA400, включающая CCD камеру и программу для обработки. Частота записи картин ДБЭ равна 25 кадрам в секунду.

3. Экспериментальные результаты

Изначально на картине ДБЭ преимущественно наблюдался диффузный фон (рис. 1, *a*), что говорит о наличии достаточно толстого слоя аморфного оксида на поверхности InSb. По мере повышения температуры

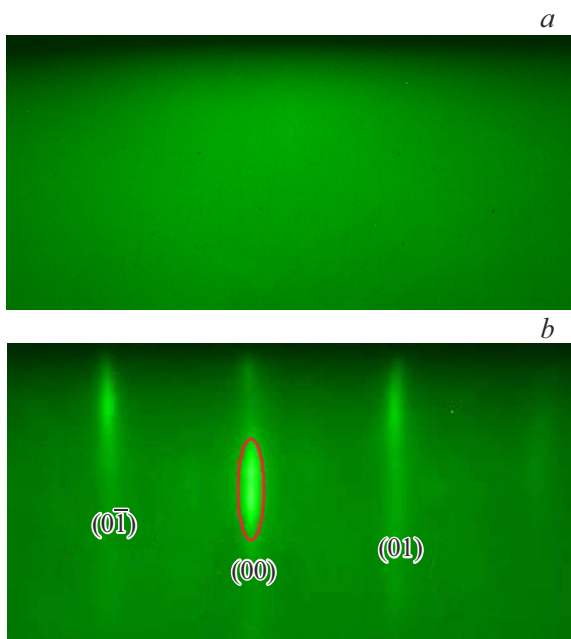


Рис. 1. Картина дифракции быстрых электронов от поверхности InSb: *a* — покрытой оксидом, *b* — после отжига при $T = 450^\circ\text{C}$. Отслеживалась интенсивность красной области.

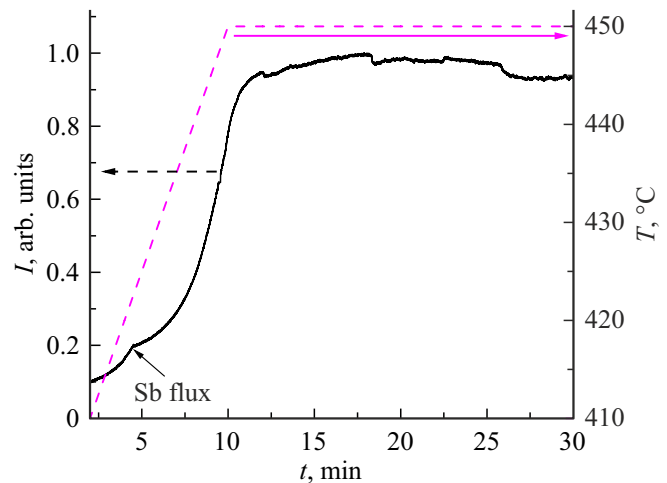


Рис. 2. Зависимость нормированной интенсивности 00 дифракционного рефлекса InSb от температуры и времени отжига. На правой оси ординат отложена температура InSb. Розовая пунктирная линия соответствует зависимости температуры от времени. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

происходило постепенное уменьшение интенсивности фона и увеличение интенсивности фундаментальных ДБЭ рефлексов InSb (рис. 1, *b*). С самого начала регистрации картины дифракции быстрых электронов, уже при $T = 410^\circ\text{C}$ интенсивность фундаментального 00 рефлекса превышала интенсивность фона. Это позволило определить местоположение 00 рефлекса InSb и области, свободные от рефлексов InSb. Поскольку цель работы заключалась в изучении эффекта потока сурьмы, то сначала регистрировались картины ДБЭ без потока сурьмы при нагреве образца в диапазоне от $T = 410$ до $T = 422.5^\circ\text{C}$, при последующем нагреве $T > 422.5^\circ\text{C}$ записывались картины ДБЭ в потоке сурьмы. Затем из записанных фильмов в выбранной области картины ДБЭ получалась кинетика интенсивности 00 рефлекса InSb.

На рис. 2 показан рост интенсивности рефлекса 00 от поверхности InSb в процессе нагрева. При подаче потока сурьмы интенсивность основного рефлекса продолжала расти, но скорость роста уменьшалась. После достижения $T = 450^\circ\text{C}$ образец выдерживался 20 мин при постоянной температуре в потоке сурьмы для полного удаления оксида. После достижения конечной температуры интенсивность основного рефлекса продолжала расти в течение 2 мин до некоторой постоянной величины. Аналогично росла интенсивность других основных рефлексов. Интенсивность фона, которая измерялась вдали от рефлексов, уменьшалась со временем.

В начале эксперимента картина дифракции представляет собой ровный фон, что говорит о достаточной толщине слоя оксида для рассеяния пучка электронов и, соответственно, уменьшения его интенсивности. При прохождении слоя толщиной S интенсивность пучка

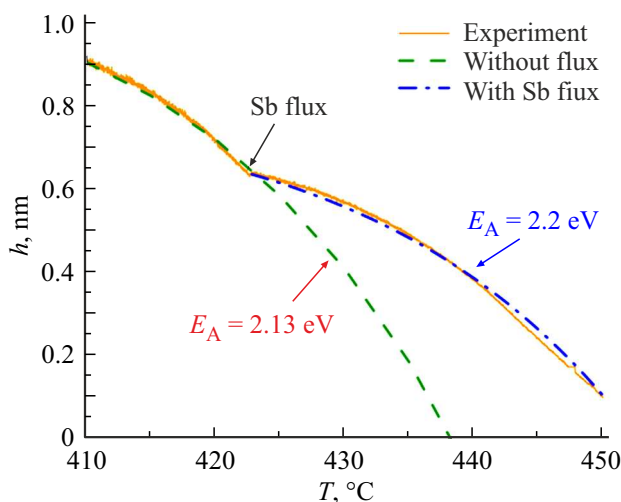


Рис. 3. Зависимость толщины оксида от температуры. Эксперимент (оранжевая сплошная линия), расчет по формуле (3) в вакууме (зеленая штриховая) и в потоке сурьмы (синяя штрихпунктирная линия).

электронов уменьшается из-за рассеяния по закону:

$$I = I_0 e^{-S/\lambda}, \quad (1)$$

где λ — длина свободного пробега электронов до рассеяния, в общем случае зависящая от энергии электронов и материала [16,17]. В геометрии ДБЭ пучок электронов падает на поверхность образца под углом 3° , электроны проходят оксид 2 раза, до и после дифракции на кристалле, поэтому

$$S = \frac{2h}{\sin(\theta)}. \quad (2)$$

Здесь θ — угол падения пучка, h — толщина оксида. Соответственно, по изменению интенсивности рефлекса, зная длину пробега электронов, можно оценить толщину оксида, через который проходит пучок электронов. Данные по длинам пробега электронов в оксидах Sb_2O_3 , Sb_2O_5 и In_2O_3 в литературе отсутствуют. Длина свободного пробега в оксидах индия и сурьмы может быть оценена с помощью формулы (modified Bethe equation) [18,19]. Длина пробега в общем случае зависит от плотности материала, энергии электронов, молярной массы, числа валентных электронов и запрещенной зоны. Для оксидов индия и сурьмы оценка длины свободного пробега электронов дает среднее значение $\lambda \approx 15$ нм.

Интенсивность центрального рефлекса повышается по мере десорбции оксида с поверхности InSb и, соответственно, уменьшения рассеяния электронов в слое оксида. На рис. 3 показана зависимость толщины слоя оксида от температуры отжига (оранжевая кривая), полученная из кинетики интенсивности 00 рефлекса (рис. 2) с использованием формул (1) и (2). Полученная толщина

оксидного слоя является эффективной толщиной, поскольку по мере удаления оксида покрытие перестает быть сплошным и приобретает фрагментарный характер. В используемой модели рассеивание при фрагментарном покрытии эквивалентно рассеиванию пучка электронов в оксиде эффективной толщины. Полученная зависимость аппроксимировалась формулой, описывающей эффективную скорость реакции удаления оксида:

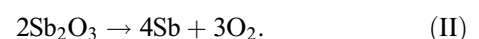
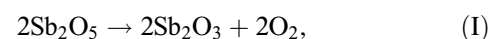
$$\frac{dh}{dt} = -k, \quad (3)$$

где $k = A e^{-\frac{E_A}{k_B T}}$ — эффективная константа скорости удаления оксида, описываемая законом Аррениуса, A — частотный фактор, E_A — энергия активации процесса удаления оксида. Величина E_A до и после включения потока сурьмы составляет 2.13 (зеленая пунктирная линия) и 2.2 эВ (синяя штриховая линия) соответственно, при частотном факторе $A = 10^{13} \text{ c}^{-1}$. Увеличение энергии активации означает уменьшение скорости удаления оксида.

Уменьшение скорости удаления оксида при подаче потока сурьмы может быть следствием влияния обратной реакции образования оксида, либо того, что сурьма препятствует удалению оксида.

4. Обсуждение результатов

Поскольку на первом этапе удаления оксида разлагается оксид сурьмы, а для удаления оксида индия необходимо выдерживать подложку при более высоких температурах длительное время [12], можно первоначально рассмотреть только процесс разложения оксида сурьмы. Оксид индия после удаления оксида сурьмы остается, видимо, в виде нанокристаллов, а не сплошной пленки [4], поэтому интенсивность дифракционного рефлекса выходит на насыщение. Процесс термического разложения оксида сурьмы на сурьму и кислород описывается реакциями [11]:



После разложения оксида сурьмы выделяются кислород и сурьма, которые могут снова образовать оксид сурьмы за счет обратной реакции либо десорбироваться с поверхности.

Для описания процесса разложения оксида и, соответственно, уменьшения его толщины была численно решена система дифференциальных уравнений (5)–(7), описывающая изменение количества Sb_2O_3 (N_{ox}) (5), сурьмы (N_{Sb}) (6) и кислорода (N_{O_2}) (7) в зависимости от температуры нагрева и времени выдержки при постоянной температуре. Уравнения включают химические реакции разложения, образования оксида Sb_2O_3 , десорбцию атомов сурьмы и молекул кислорода с поверхности, константы скоростей реакций $K(T)$ которых

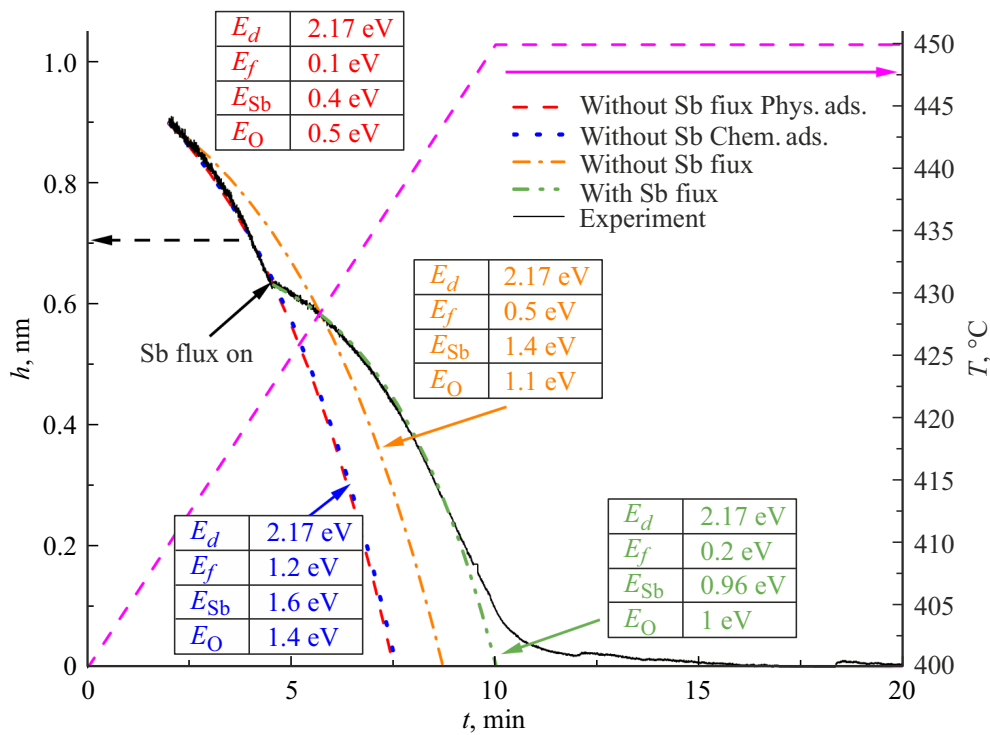


Рис. 4. Экспериментальная и расчетная зависимости толщины оксида от температуры и времени отжига при различных параметрах реакций. На правой оси ординат отложена температура InSb. Розовая пунктирная линия соответствует зависимости температуры от времени.

в системе уравнений обозначены индексами diss, form, des. Sb и des. O соответственно, а также поток сурьмы на поверхность (F). Рассматривалась реакция разложения для Sb_2O_3 , поскольку интенсивность дифракционного рефлекса возрастает при протекании реакции II, при протекании же реакции I оксид сурьмы Sb_2O_5 переходит в оксид сурьмы Sb_2O_3 , что практически не меняет рассеяния пучка в пленке оксида ввиду ранее приведенной оценки для длины свободного пробега электронов в оксидах сурьмы:

$$\frac{dN_{ox}}{dt} = -2K_{diss}(T)N_{ox}^m(t) + 2K_{form}(T)N_{Sb}(t)N_{O_2}(t), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_{Sb}}{dt} &= 4K_{diss}(T)N_{ox}^m(t) - 4K_{form}(T)N_{Sb}(t)N_{O_2}(t) \\ &\quad - K_{des.Sb}(T)N_{Sb}(t) + F, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_{O_2}}{dt} &= 3K_{diss}(T)N_{ox}^m(t) - 3K_{form}(T)N_{Sb}(t)N_{O_2}(t) \\ &\quad - K_{des.O}(T)N_{O_2}(t). \end{aligned} \quad (7)$$

В системе уравнений реакция разложения оксида сурьмы рассчитывалась для 0 и 1 порядков ($m = 0, 1$), т.е. когда скорость разложения либо не зависит от собственной концентрации, либо пропорциональна первой степени собственной концентрации оксида. Поток сурьмы (F) в уравнениях принимался равным значению $3.3 \cdot 10^{-6}$ Торр, измеренному ионизационным ва-

кууметром, которое эквивалентно плотности потока $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. За монослой оксида принималась величина 0.64 нм [20]. Константы скоростей реакций рассчитывались по закону Аррениуса. Порядок реакции десорбции молекул кислорода и атомов сурьмы принимался равным 1, частотный фактор в константах скоростей реакции принят равным своему характерному значению 10^{13} с^{-1} [21]. Энергии активации химических реакций определялись при аппроксимации экспериментальных зависимостей толщины оксида от температуры отжига решением системы уравнений (5)–(7). Было рассмотрено два случая — физическая или химическая адсорбция молекул кислорода и атомов сурьмы, образованных после разложения оксида или осажденных из потока на поверхности InSb или оксида.

Сначала описывался участок кривой без потока сурьмы ($F = 0$). Данная область описывается при нулевом порядке реакции разложения оксида сурьмы. При физической адсорбции величины энергий десорбции сурьмы и кислорода с поверхностью составляют сотни мэВ [22]. Расчет показывает, что при величине энергии десорбции 400 и 500 мэВ для сурьмы ($E_{des.Sb}$) и кислорода ($E_{des.O}$) соответственно определяющей является энергия разложения оксида (E_d). Расчетная кривая описывает экспериментальную зависимость при $E_d = 2.17 \text{ эВ}$ (красная пунктирная линия на рис. 4). Энергия активации образования оксида (E_{form}) даже при малых значениях, $\leq 200 \text{ мэВ}$, не влияет на скорость удаления оксида,

поскольку исходные элементы легко десорбируются. Реакция образования оксида не влияет на расчетную зависимость до значений $E_{des,Sb}$ и $E_{des,O} \sim 1$ эВ. При дальнейшем повышении $E_{des,Sb}$ и $E_{des,O}$ до значений, соответствующих химической адсорбции, реакция формирования оксида начинает уменьшать скорость удаления оксида (оранжевая штрихпунктирная линия на рис. 4). Для согласования с экспериментом необходимо увеличивать E_{form} или уменьшать E_d (синяя пунктирная кривая на рис. 4), при этом возникает новый набор энергий, описывающих эксперимент. Таким образом, при аппроксимации зависимости без потока сурьмы определить значения энергии активации реакций невозможно из-за взаимной зависимости между энергиями активации различных химических реакций. Как физически, там и химически адсорбированные атомы кислорода и сурьмы удовлетворяют экспериментальным данным.

При анализе области с потоком сурьмы ($F \neq 0$) также варьировались энергии активации реакции в пределах, соответствующих физической и химической адсорбции. Область с потоком сурьмы, аналогично области без потока, описывается при нулевом порядке реакции разложения оксида сурьмы. При $E_{des,Sb}$ и $E_{des,O}$ до величины ~ 1 эВ поток сурьмы не влияет на скорость удаления оксида сурьмы даже при малой $E_{form} \sim 200$ мэВ. Соответственно, для уменьшения скорости удаления оксида при подаче потока сурьмы, сурьма и кислород должны быть химически адсорбированы на поверхности с $E_{des,Sb}$ и $E_{des,O} \geq 1$ эВ. Варьируя E_d и E_{form} , можно описать экспериментальную зависимость в потоке сурьмы (зеленая кривая на рис. 4). Анализируя только область с потоком сурьмы, можно исключить значения $E_{des,Sb}$ и $E_{des,O} \leq 1$ эВ, однако неопределенность в значениях энергий активации процессов десорбции продуктов реакции разложения оксида и формирования оксида остается.

В работе [23] показано, что энергия десорбции сурьмы при частотном факторе 10^{13} с^{-1} составила $E_{des,Sb} = 1.6$ эВ. Данное значение соответствует химической адсорбции и входит в установленный выше диапазон энергий, поэтому при дальнейших расчетах использовалось это значение. Анализ показал, что энергии разложения E_d и формирования оксида сурьмы E_{form} , определяющие скорости соответствующих реакций, в разной степени влияют на скорость удаления оксида без потока и в потоке сурьмы. Значение E_d одинаково влияет на скорость процесса в обоих случаях, а E_{form} сильнее влияет на скорость процесса в потоке сурьмы из-за увеличения концентрации сурьмы на поверхности. В результате для E_d имеется узкий диапазон возможных значений $2.15 < E_d < 2.18$ эВ, при которых можно подобрать E_{form} и $E_{des,O}$, позволяющих описать экспериментальную зависимость. При $2.18 \leq E_d$ или $E_d \leq 2.15$ не существует параметров $E_{des,O}$ и E_{form} , при которых расчет описывает как область без потока, так и с потоком сурьмы одновременно. Например, на рис. 5 показана расчетная кривая при $E_d = 2.15$ эВ, $E_{des,Sb} = 1.6$ эВ, $E_{des,O} = 1.3$ эВ и $E_{form} = 1.07$ эВ. Видно, что вклад реакции образования

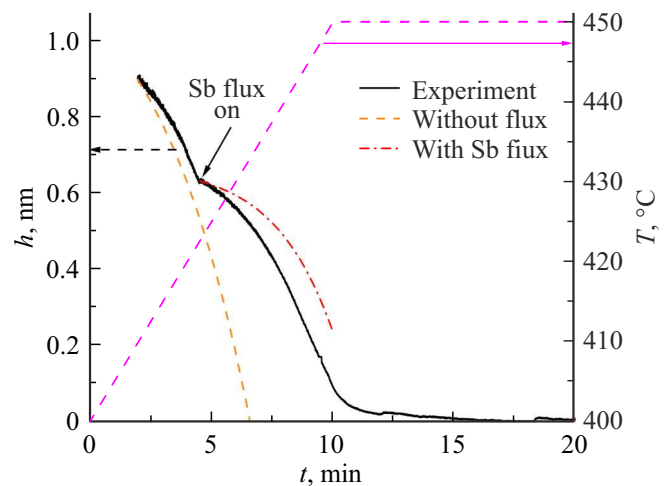


Рис. 5. Экспериментальная и расчетная зависимости толщины оксида от температуры и времени отжига при $E_{des,Sb} = 1.6$ эВ, $E_{des,O} = 1.3$ эВ, $E_d = 2.15$ эВ и $E_{form} = 1.07$ эВ. На правой оси ординат отложена температура. Розовая пунктирная линия соответствует зависимости температуры от времени.

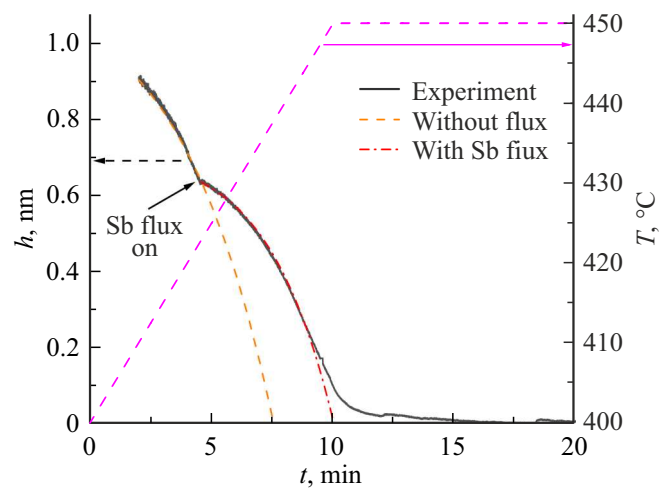


Рис. 6. Экспериментальная и расчетная зависимости толщины оксида от температуры и времени отжига при $E_{des,Sb} = 1.6$ эВ, $E_{des,O} = 1.3$ эВ, $E_d = 2.172$ эВ и $E_{form} = 1.14$ эВ. На правой оси ординат отложена температура. Розовая пунктирная линия соответствует зависимости температуры от времени.

оксида для области с потоком сурьмы слишком высок и скорость удаления оксида ниже, чем в эксперименте, в то же время скорость удаления оксида в области без потока сурьмы выше, чем в эксперименте. Соответственно, для согласования расчета и эксперимента при таких значениях энергий необходимо одновременно увеличивать вклад реакции образования в области без потока и уменьшать в области с потоком, что невозможно. При выборе значения E_d , которое входит в указанный диапазон, например, $E_d = 2.172$ эВ, при $E_{form} = 1.14$ эВ, $E_{des,Sb} = 1.6$ эВ и $E_{des,O} = 1.3$ эВ расчетная зависимость толщины от времени описывает эксперимент (рис. 6).

Таким образом, при заданной величине $E_{\text{des,Sb}} = 1.6$ эВ и полученном значении $E_d \approx 2.17$ эВ значения энергий E_{form} и $E_{\text{des,O}}$, при которых описываются экспериментальные данные, являются взаимозависимыми. Для согласования расчета и эксперимента по мере повышения $E_{\text{des,O}}$ необходимо уменьшать скорость реакции образования (увеличивать E_{form}), поскольку концентрация кислорода увеличивается. При $E_{\text{des,O}} \geq 2$ эВ нельзя подобрать E_{form} , при которой расчет описывает эксперимент. Если E_{form} и $E_{\text{des,O}} \gg k_B T$, то реакции образования оксида и десорбции кислорода подавлены, т. е. кислород, образованный после разложения оксида, накапливается на поверхности, но не вступает в реакцию с сурьмой для образования оксида и не десорбируется, что противоречит эксперименту.

Данные в литературе по десорбции кислорода с поверхности InSb или с поверхности оксидов индия и сурьмы отсутствуют. $E_{\text{des,O}}$ с поверхности металлов (Au, Ag, Pt) варьируется от 1.19 до 1.68 эВ [24,25], что соответствует химической адсорбции. В нашем расчете данному диапазону $E_{\text{des,O}}$ соответствует диапазон $E_{\text{form}} = 1.03\text{--}1.52$ эВ, при котором расчет описывает эксперимент.

5. Заключение

В работе *in situ* изучен процесс термического удаления оксида с поверхности InSb с помощью дифракции быстрых электронов. Регистрация основного рефлекса InSb становится возможной при толщине оксидного слоя ~ 1 нм. На основе эволюции интенсивности рефлексов ДБЭ рассчитана зависимость толщины оксида от температуры и времени отжига. Зависимость толщины оксида от времени описана с помощью системы уравнений для реакций разложения и образования оксида. Показано, что скорость удаления оксида уменьшается при подаче потока сурьмы за счет обратной реакции — образования оксида. Для влияния на процесс удаления оксида сурьма и кислород должны быть химически адсорбированы на поверхности, физически адсорбированные сурьма и кислород даже при наличии потока сурьмы и энергиях активации реакции образования оксида $\sim k_B T$ не влияют на процесс удаления оксида из-за интенсивной десорбции элементов. Определена энергия активации разложения оксида сурьмы 2.17 эВ при энергиях десорбции сурьмы 1.6 эВ и частотном факторе 10^{13} с⁻¹. Энергии активаций для формирования оксида сурьмы (E_{form}) и десорбции кислорода ($E_{\text{des,O}}$), при которых расчет описывает эксперимент, определены в диапазонах: $E_{\text{form}} = 1.03\text{--}1.52$ эВ, $E_{\text{des,O}} = 1.19\text{--}1.68$ эВ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Evirgen, J. Abautret, J.P. Perez, A. Cordat, A. Nedelcu, P. Christol. *Electron. Lett.*, **50** (20), 1472 (2014).
- [2] М.А. Суханов, А.К. Бакаров, Д.Ю. Протасов, К.С. Журавлев. *Письма ЖТФ*, **46** (4), 3 (2020).
- [3] J. Abautret, J.P. Perez, A. Evirgen, F. Martinez, P. Christol, J. Fleury, H. Sik, R. Cluzel, A. Ferron, J. Rothman. *J. Appl. Phys.*, **13** (18), 183716 (2013).
- [4] А.К. Бакаров, А.К. Гутаковский, К.С. Журавлев, А.П. Ковчавцев, А.И. Торопов, И.Д. Бурлаков, К.О. Болгарь, П.В. Власов, А.А. Лопухин. *ЖТФ*, **87** (6), 900 (2017).
- [5] W.K. Liu, W.T. Yuen, R.A. Stradling. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **13** (4), 1539 (1995).
- [6] H. Simchi, S. Bahreani, M.H. Saani. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, **33** (1), 1 (2006).
- [7] R. Tessler, C. Saguy, O. Klin, S. Greenberg, E. Weiss, R. Akhvediani, R. Edrei, A. Hoffman. *Appl. Phys. Lett.*, **88** (3), 031918 (2006).
- [8] Н.А. Виглин, И.В. Грибов, В.М. Цвелиховская, Е.И. Патраков. *ФТП*, **53** (2), 277 (2019).
- [9] E. Weiss, O. Klin, S. Grossman, S. Greenberg, P.C. Klipstein, R. Akhvediani, R. Tessler, R. Edrei, A. Hoffman. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **25** (4), 736 (2007).
- [10] W. Mönch. *Semiconductor surfaces and interfaces* (Springer Science & Business Media, 2013).
- [11] W.K. Liu, M.B. Santos. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **14** (2), 647 (1996).
- [12] J.F. Klem, J.Y. Tsao, J.L. Reno, A. Dartye, S. Chadda. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **9** (6), 2996 (1991).
- [13] J.J. Bomphrey, M.J. Ashwin, T.S. Jones, G.R. Bell. *Results Phys.*, **5**, 154 (2015).
- [14] P.D. Brewer, D.H. Chow, R.H. Miles. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **14** (3), 2335 (1996).
- [15] B.R. Hancock, H. Kroemer. *J. Appl. Phys.*, **55** (12), 4239 (1984).
- [16] A. Ichimiya, P. Cohen. *Kinematic electron diffraction. In Reflection High-Energy Electron Diffraction* (Cambridge, Cambridge University Press, 2004) p. 130. doi: 10.1017/CBO9780511735097.011
- [17] C.J.J. Powell. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **38** (2), 023209 (2020).
- [18] H. Shinotsuka, S. Tanuma, C.J. Powell, D.R. Penn. *Surf. Interface Anal.*, **51** (4), 427 (2019).
- [19] S. Tanuma, C.J. Powell, D.R. Penn. *Surf. Interface Anal.*, **43** (3), 689 (2011).
- [20] W. Han, P. Huang, L. Li, F. Wang, P. Luo, K. Liu, X. Zhou, H. Li, X. Zhang, Y. Cui, T. Zhai. *Nature Commun.*, **10** (1), 4728 (2019).
- [21] Z. Wang, E.G. Seebauer. *Appl. Surf. Sci.*, **181** (1–2), 111 (2001).
- [22] J. Tao, A.M. Rappe. *Phys. Rev. Lett.*, **112** (10), 106101 (2014).
- [23] J.J. Zinck, E.J. Tarsa, B. Brar, J.S. Speck. *J. Appl. Phys.*, **82** (12), 6067 (1997).
- [24] D. Tsiplakides, S. Neophytides, C.G. Vayenas. *Ionics*, **3** (3), 201 (1997).
- [25] N.D.S. Canning, D. Outka, R.J. Madix. *Surf. Sci.*, **141** (1), 240 (1984).

Редактор Г.А. Оганесян

Oxide desorption process from InSb surface under Sb flux

M.A. Sukhanov, A.K. Bakarov, K.S. Zhuravlev

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences,
630090 Russian, Novosibirsk

Abstract In this work, the process of oxide removal from the InSb (001) surface was studied in-situ by high-energy electron diffraction in vacuum and under an antimony flux. The dependence of the oxide thickness on the annealing temperature was obtained. It has been found that the antimony flux slows down the process of oxide removal due to the oxide formation reaction. The oxide removal process was described by a system of kinetic equations, the activation energy of oxide decomposition was determined.