

## Влияние поверхностного состава на плавление тонких пленок InSb

© Ю.В. Гуляев, А.А. Веселов, А.Г. Веселов, Е.И. Бурылин, А.С. Джумалиев,  
Ю.А. Зюрюкин, О.А. Кирясова, С.Л. Рябушкин

Саратовское отделение Института радиотехники и электроники РАН,  
410019 Саратов, Россия

(Поступило в Редакцию 3 ноября 2003 г.)

Показана возможность плавления тонких ( $0.1\text{--}0.5\ \mu\text{m}$ ) пленок InSb непосредственно в атмосфере под защитным слоем собственных окислов с целью получения высокой величины подвижности основных носителей (до  $25\ 000\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ). Экспериментально исследованы особенности синтеза пленок, в основу которого положено термическое импульсное испарение порошка InSb в вакууме. Технология позволила обеспечить необходимую неоднородность состава осажденной пленки по толщине для последующего плавления на воздухе.

Расширение круга задач, решаемых функциональной электроникой, стимулирует постоянный интерес к представителю класса соединений  $A^{III}B^V$  — сурьмянистому индию, поскольку его отличает малая ширина запрещенной зоны ( $0.165\ \text{eV}$ ) и исключительно большая величина подвижности электронов (до  $78\ 000\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  в монокристалле при комнатной температуре) [1]. Эффективная масса электронов в InSb составляет 0.014 от массы покоя свободных электронов. Перечисленные свойства настолько отличают данное соединение от других соединений того же класса, что в таких приборах обработки информации, как магниторезисторы, датчики Холла, усилители, детекторы и конвольверы поверхностных акустических волн, целесообразно использовать именно пленки InSb [1].

Хорошо известно [1], что создание тонких пленок InSb, интерес к которым обусловлен необходимостью повысить полное сопротивление образца при сохранении подвижности носителей, отличается особыми трудностями. Большинство работ по термическому осаждению пленок ставят задачей получение осаждаемого материала со стехиометрическим составом и последующим нанесением защитного слоя для сохранения стехиометрии при отжиге или переплавке. Однако воспроизводимость этих операций крайне низка: трудно обеспечить стехиометрию и тем более сохранить ее из-за высокого давления пара возгоняющейся сурьмы при нагреве подложки до температуры плавления. Тем не менее этот путь нашел множество технологических реализаций, хотя в большинстве случаев воспроизводимость параметров так и не была достигнута [1].

Рассмотрим предлагаемую авторами технологию осаждения пленки, реализующую неоднородность состава (имеется в виду процентное содержание In и Sb) по толщине, что и обеспечивает возможность последующего плавления под слоем собственных окислов. Термическое испарение порошка InSb и осаждение пленки на поликоровую подложку проводилось импульсным методом [1,2] из квазизамкнутого танталового тигля. Предварительное обезгаживание подложки проводилось при температуре  $500^\circ\text{C}$  в течение 5 min. В отличие от дискретного

способа, где порошок InSb из вибробункера падает на заранее разогретый тигель, испарение из квазизамкнутого тигля не обеспечивает равномерность состава по всей поверхности подложки [1]. Стехиометрия состава пленки сохраняется лишь на участке подложки напротив сопла тигля, как качественно показано на рис. 1, и сильно зависит от времени разогрева тигля [2,3]. Метод импульсного испарения отличают простота и повторяемость при точном соблюдении постоянства двух параметров: массы загруженного порошка (в нашем случае 20 mg) и времени нагрева тигля до полного испарения, что и определило наш выбор метода осаждения пленки. Подложка была расположена на расстоянии 40 mm от сопла тигля. Края сопла развернуты к поверхности подложки на угол  $20\text{--}30^\circ$ . При этом направление потока испаряющегося материала, приводящее к пространственной неоднородности состава (рис. 1), обеспечивало начальную повышенную концентрацию сурьмы на поверхности пленки. Тигель нагревался за  $1\text{--}2\ \text{s}$  до  $2000^\circ\text{C}$  импульсом тока величиной до 150 А. Конфигурация тигля, расстояние до подложки, наклон сопла были подобраны эмпирически при постоянном контроле состава поверхности пленки методом оже-спектроскопии. Далее учитывался тот факт, что на состав пленки кроме способа осаждения влияет температура подложки.

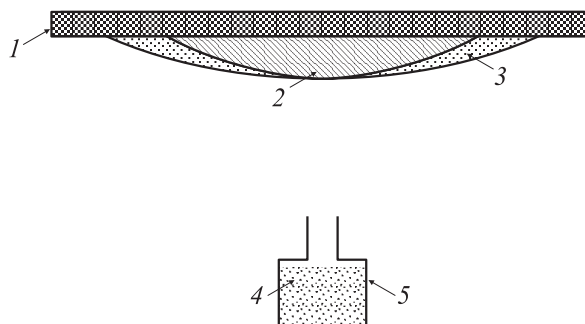
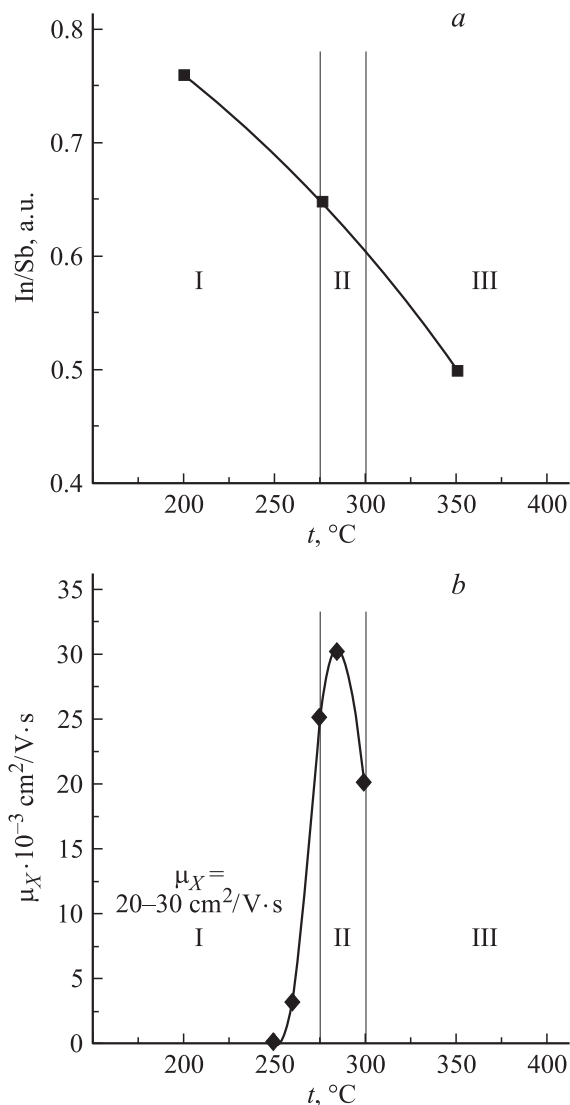


Рис. 1. Качественный характер распределения состава In и Sb по подложке. 1 — поликоровая подложка; 2 — In, Sb; 3 — Sb; 4 — порошок InSb; 5 — поперечный разрез тигля.



**Рис. 2.** *a* — зависимость количественного отношения In/Sb на поверхности подложки от температуры подложки, *b* — зависимость холловской подвижности от температуры подложки.

На рис. 2 представлены зависимости содержания In и Sb на поверхности пленки, измеренные методом ожеспектроскопии до плавления и холловской подвижности после плавления от температуры подложки в момент осаждения. Холловская подвижность измерялась четырехзондовым методом Ван-дер-Пау [4]. Заметим, что после плавления состав поверхности пленки становился стехиометрическим, что и объясняет резкое увеличение подвижности.

Зависимость подвижности носителей в плазме от температуры подложки в момент напыления дает довольно четкое представление о характере происходящих процессов. При температуре подложки порядка 200°C состав пленки на поверхности фактически определен геометрией и режимом нагрева тигля. Плавление пленок, полученных при этих температурах, в этом случае осуществить не удается (рис. 2, зона I). На поверхности

наблюдается глобуляция In — образование полусферических капелек диаметром порядка нескольких  $\mu\text{m}$  в основании. Подвижность составляет десятки  $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . Эти особенности наблюдаются до 270–280°C. И только в узком температурном диапазоне (280–290°C, зона II), где содержание сурьмы на поверхности пленки примерно в 4 раза превышает содержание индия, наблюдается окисление верхней поверхности пленки с изменением цвета и последующее (560–580°C, зона III) появление жидкой фазы. Сам процесс однородного плавления так же, как в [1,5], наблюдался визуально в отраженном свете благодаря различию отражения от поверхностей твердой и жидкой фаз — диффузное и зеркальное соответственно. Плавление проходило в атмосфере, подложка с расплавом быстро удалялась с подогревателя, так что пленка в жидкой фазе находилась лишь доли секунды. С увеличением времени пребывания пленки в расплавленном состоянии наблюдалось разрушение оксидного слоя и реиспарение пленки.

Можно предположить, что избыток сурьмы на поверхности при нагреве частично окисляется, что заметно по изменению цвета пленки при температуре 300–350°C. При последующем нагреве остаток сурьмы переходит в расплав под образовавшимся при окислении защитным слоем, поэтому представляет интерес выяснить влияние окисления верхнего слоя на свойства пленки, что и было сделано в настоящей работе. Обнаружилось, что этот слой действительно образован окисленной сурьмой, поскольку он реиспаряется при 660°C (температура испарения оксида индия  $\sim 2000^\circ\text{C}$ ) и успешно защищает пленку при плавлении. Существенное увеличение подвижности (рис. 2) по сравнению с результатами, представленными в [1], мы связываем с устранением донорных центров, образованных избыточной сурьмой [1]. В нашем случае избыточная сурьма уходит, вероятно, или в окисел, или в расплав. Подобная трактовка происходящих при плавлении процессов позволяет объяснить высокие значения холловской подвижности в получаемых пленках по сравнению с результатами, полученными другими авторами [1], которые использовали специальные защитные слои.

Проведенная серия экспериментов получения пленок по указанной выше методике показала высокую степень воспроизводимости ( $> 90\%$ ) значений холловской подвижности носителей.

Данная технология позволяет с высокой степенью воспроизводимости синтезировать пленки с подвижностью 25 000–30 000  $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  при толщинах 0.1–0.5  $\mu\text{m}$ .

Представленные результаты, по мнению авторов, могут стать основой для развития технологий синтеза тонких пленок с воспроизводимыми электрофизическими параметрами.

Достигнутые результаты по величинам холловской подвижности при столь малых толщинах (до 0.1  $\mu\text{m}$ ) могут стать основой экспериментов по квантово-размерным, радио- и акустоэлектрическим эффектам.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 01-02-16317).

## Список литературы

- [1] *Касьян В.А., Кетруш П.И., Никольский Ю.А., Пасечник Ф.И.* Тонкие пленки антимонида индия. Кишинев: Штиница, 1989.
- [2] *Петросян В.И., Веселов А.Г., Синицин Н.И.* и др. // Микроэлектроника. 1979. Т. 8. Вып. 6.
- [3] *Веселов А.Г., Рябушкин С.Л., Шулер И.Я.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 11.
- [4] *Кучис Е.В.* Методы исследования эффекта Холла. М.: Сов. радио, 1974.
- [5] *Веселов А.Г., Котелянский И.М., Крикунов А.И.* и др. Способ получения тонких пленок антимонида индия. АС. СССР. № 713179. 1979.