

# АНТИМОНИД ИНДИЯ: СИНТЕЗ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Сочнева Е. В.

Позняк А. А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Рассмотрены свойства, методы синтеза, традиционные и новые применения антимонида индия.

Изготовление наноразмерных структур в настоящее время привлекает огромное внимание благодаря их потенциальному использованию для высокоплотной магнитной памяти, одноэлектронных приборов, нано-электродов для прямого осаждения наночастиц из газовой фазы и оптических сред [1].

Заполнение металлическими и полупроводниковыми материалами диэлектрических матриц достаточно широко применяется для формирования различных наноструктур. Среди множества пористых материалов перспективной матрицей является пористый анодный оксид алюминия (ПАОА), содержащий массив равномерно расположенных вертикальных пор (рис. 1). Изготовление наноструктур на основе гексагонально-упорядоченного ПАОА в качестве маски или матричной структуры дешевле, чем изготовление таких же структур электроннолучевой литографией [2]. Кроме того, возможность целенаправленного и воспроизводимого варьирования параметрами такой квазирегулярной ячеисто-пористой структуры в процессе формирования обуславливает проявление значительного интереса к этому материалу в связи с исключительными перспективами его использования в качестве диэлектрической матрицы (шаблона) для дальнейшего осаждения в неё материалов.

При использовании шаблонов из ПАОА для новых применений в наноструктурах, поры должны быть заполнены проводящим, полупроводящим, оптически активным материалом, например, путём электрохимического осаждения. В противоположность другим методам осаждения, таким как химическое осаждение из паровой фазы (CVD), во время электрохимического осаждения рост наностолбиков начинается на дне поры и продолжается по направлению от дна поры к её устью, а морфологическая структура ПАОА и электрические режимы задают геометрические параметры осаждаемых объектов. Свойства полученных наноструктур в значительной мере определяются их геометрией и зависят от природы осаждаемого в матрицу материала. Так, большой интерес представляет получение регулярных одно- двух- и трёхмерных наноструктурированных массивов и нанопроводов различных материалов, в том числе полупроводников группы  $A^{III}B^V$  и, в частности, антимонида индия –  $InSb$ .

Антимонид индия – неорганическое бинарное химическое соединение индия и сурьмы, имеет вид тёмно-серого серебристого металла или порошка со стекловидным блеском [4, 5]; внешний вид образца показан на рис. 2.  $InSb$  имеет ку-

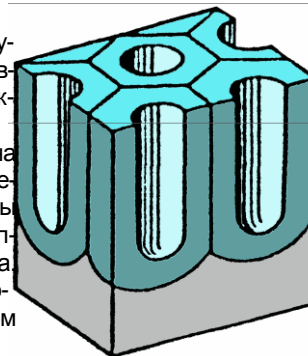


Рис. 1 – Схематическое изображение поперечного сечения  $Al_2O_3$  анодного [3]

бическую кристаллическую структуру сфалерита с постоянной решётки 0,647877 нм [6], трёхмерная структурная модель показана на рис. 3. Это соединение выделяется из всей группы полупроводников типа  $A^{III}B^V$  своими уникальными свойствами. Антимонид индия является узкозонным прямым полупроводником [4] и имеет малую ширину запрещённой зоны  $E_g$  (0,2355 эВ при 0 K, 0,180 эВ при 298 K) [6], благодаря чему его электропроводность уже при температурах много ниже комнатной становится собственной. Энергия ионизации донорных примесей (S, Se, Te) очень мала. Вследствие малого значения  $E_g$  *InSb* относится к вырожденным полупроводникам, особенностью которых является слабая зависимость основных характеристик от температуры [7]. Обладая электронным типом проводимости, характеризуется самой высокой подвижностью носителей заряда (около 78000 см<sup>2</sup>/(В·с)), а также имеет самую большую длину свободного пробега электронов (до 0,7 мкм при 300 K) среди всех известных полупроводниковых материалов, за исключением, возможно, углеродных материалов (графен, углеродные нанотрубки) [4].

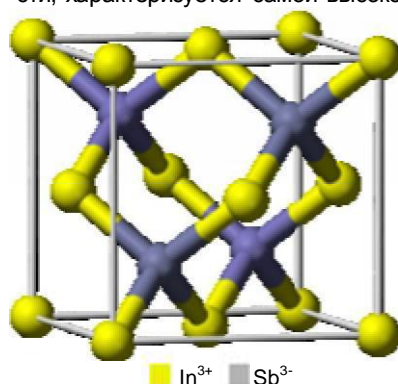


Рис. 3 – Трёхмерная модель кристаллической структуры *InSb* [4]

Традиционными способами антимонид индия получают сплавлением *In* со *Sb* в кварцевом контейнере в вакууме (~0,1 Па) при 800-850 °С. Очищают зонной плавкой в атмосфере водорода. Монокристаллы выращивают по методу Чохральского в атмосфере инертного газа (*Ar*, *He*, *N<sub>2</sub>*) или *H<sub>2</sub>* либо в вакууме (~50 кПа). Эпитаксиальные плёнки получают: осаждением из раствора *InSb* в расплаве *In* при 350-450 °С; методом молекулярно-лучевой эпитаксии (реакцией молекулярных пучков *In* и *Sb* в вакууме 10<sup>-9</sup> Па с последующим осаждением на нагретую до 400-500 °С подложку); методом вакуумного напыления (пары *InSb* в вакууме ~10<sup>-4</sup> Па конденсируются на нагретой до 350-400 °С подложке из *InSb*) [6]; одним из способов получения является также химическое осаждение из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений (англ. *Metalorganic chemical vapour deposition, MOCVD*) [4, 8]. Однако все эти способы малопригодны для возможных нанотехнологических применений. В ряде работ сообщается об успешном электрохимическом синтезе антимонида индия из различных электролитов и на катодах различной природы [9, 10]. Особенно привлекают внимание работы, посвящённые осаждению *InSb* в матрицу ПАОА, например [11, 12]. Следует отметить, что в случае катодного осаждения с использованием ПАОА в качестве шаблона процесс синтеза материала сопряжён с одновременным формированием объектов с заданными с помощью матрицы формой и размерами, а электрохимический синтез полупроводникового соединения протекает в мягких условиях, не требует вакуумирования и достаточно безопасен для окружающей среды.

Антимонид индия применяется для изготовления туннельных диодов: по сравнению с германиевыми диоды из *InSb* обладают лучшими частотными свойствами при низких температурах. Биполярные транзисторы, работающие на частотах до 85 ГГц, были созданы из антимонида индия в конце 1990-х. Полевые транзисторы, работающие на частотах более чем в 200 ГГц, появились недавно (*Intel/ QinetiQ*). Полупроводники из антимонида индия также способны работать при напряжении в 0,5 В, что снижает их энергопотребление [4]. Кроме того, антимонид индия используют для изготовления фотоэлементов высокой чувствительности – фотодиодов, фоторезисторов, датчиков Холла, оптических фильтров, термоэлектрических генераторов и холодильников [5, 6]. Электрохимический синтез антимонида индия позволяет формировать полевые нанотранзисторы (рис. 4) [10], фотонные кристаллы [13] и перспективен для создания других приборов, основанных на квантовых эффектах [11].



Рис. 2 – Внешний вид образца *InSb* [4]

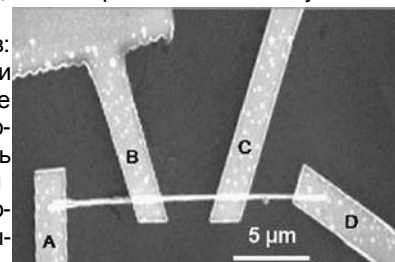


Рис. 4 – Микрофотография полевого транзистора, выполненного из нанопровода *InSb* [10]

Список использованных источников:

1. AlMawlawi, D. Magnetic properties of Fe deposited into anodic aluminum oxide pores as a function of particle size / D. AlMawlawi, N. Coombs, M. Moskovits // *Journal of Applied Physics*. – 1991. – Vol. 70, Iss. 8. – P. 4421-4425.
2. Nonlithographic Nano-Wire Arrays: Fabrication, Physics, and Device Applications / Dmitri Routkevitch [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 1996. – Vol. 43, № 10. – P. 1646-1657.
3. Bohler, H. Organisch gefärbte anodisch erzeugte Oxidschichten / H. Bohler // *Galvanotechnik*. – 1991. – Bd. 82, № 9. – S. 3048-3052.
4. Антимонид индия // Википедия, свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Антимонид\\_индия](http://ru.wikipedia.org/wiki/Антимонид_индия). – Дата доступа: 09.04.2012.
5. ИНДИЯ АНТИМОНИД // АКАДЕМИК. Словари и энциклопедии на Академике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/es/ИНДИЯ>. – Дата доступа: 12.04.2012.
6. ИНДИЯ АНТИМОНИД // ХиМик. Сайт о химии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/1685.html>. – Дата доступа: 09.04.2012.
7. ИНДИЯ АНТИМОНИД // МЕГАЭНЦИКЛОПЕДИЯ КИРИЛЛА И МЕФОДИЯ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.megabook.ru/Article.asp?AID=635042>. – Дата доступа: 12.04.2012.
8. Осаждение металлоорганических соединений из газообразной фазы // Википедия, свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Осаждение\\_металлоорганических\\_соединений\\_из\\_газообразной\\_фазы](http://ru.wikipedia.org/wiki/Осаждение_металлоорганических_соединений_из_газообразной_фазы). – Дата доступа: 12.04.2012.

9. Yang M.-H. Electrodeposition of Indium Antimonide from the Water-Stable 1-Ethyl-3-methylimidazolium Chloride/Tetrafluoroborate Ionic Liquid / M.-H. Yang, M.-Ch. Yang, I-W. Sun // Journal of The Electrochemical Society. – 2003. – Vol. 150, Iss 8. – P. C544-C548.
10. Electrochemical Growth of InSb Nanowires and Report of a Single Nanowire Field Effect Transistor / M.I. Khan [et al.] // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. – 2008. – Vol. 3. – P. 199-202,
11. Fabrication of Highly Ordered InSb Nanowire Arrays by Electrodeposition in Porous Anodic Alumina Membranes / X. Zhang, Y. Hao, G. Meng, L. Zhang // Journal of The Electrochemical Society. – 2005. – Vol. 152, Iss. 10. – P. C664-C668.
12. Mohammad, A. Electrodeposition of Indium Antimonide Nanowires in Porous Anodic Alumina Membranes / A. Mohammad [et al.] // 18<sup>th</sup> University Government Industry Micro/Nano Symposium: Proceedings of Symposium, West Lafayette, IN, 2010 [Electronic resource] / [S. l.], 2010. – P. 186-189. – Mode of access: <http://www.physics.purdue.edu/quantum/files/Micro-Nano%20symposium%20proc%20-%20Electrodeposition%20of%20In-Sb%20Nanowires.pdf>. – Date of access: 12.04.2012.
13. Fülöp, G.T. From Electrodeposited InSb to Photonic Crystals and Nanopatterned Molecular Templates: Dis. ... Dr. of Phil. / G.T. Fülöp. – Cleveland, 2004. – 156 Sheets.