

Возможности трехмерной печати уже сейчас используются для создания моделей и компонентов микроэлектронных устройств, что можно использовать в различных производственных, образовательных и научных целях. При этом реализуются такие преимущества трехмерной печати, как:

- Использование меньшего количества материала;
- Быстрое прототипирование микроэлектронных изделий;
- Быстрое создание мелкосерийных изделий[3].

Трехмерная печать позволяет печатать различными материалами, что уже сейчас используется для создания приборов и устройств электроники, в том числе на гибких подложках[4]. Так же развитие трехмерной печати позволит быстрое создание моделей и опытных образцов изделий, что так же скажется на скорости и качестве разработки микроэлектронных устройств.

Список использованных источников:

1. Scotten W. Jones, Introduction to Integrated Curcuit Technology: Textbook / ICKnowledge LCC. – Georgetown, MA, 2012.
2. 3D-printed microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors: Article / Sung-Yueh Wu, Chen Yang, Wensyang Hsu [& others] // Nature. – 2015. – July. – 20.
3. 3dtoday [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://3dtoday.ru/>.
4. Hiroki Ota, Sam Emaminejad, Yuji Gao, Application of 3D Printing for Smart Objects with Embedded Electronic Sensors and Systems / Esther Levy // Advanced Materials Technologies – April 2016.

## ОСОБЕННОСТИ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ КРЕМНИЯ ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

*Трафименко А.Г.*

*Данилюк А.Л. – к.ф.-м.н., доцент*

В настоящее время активно исследуются наноструктуры, функционирующие за счет наличия вакуумных промежутков. Особенно важным представляется использование кремниевых технологий. В данной работе анализируются особенности автоэлектронной эмиссии из кремния в вакуум при низкой температуре, связанные с механизмами проводимости легированного кремния в определенных температурных диапазонах.

Преимущества вакуумных наноэлектронных приборов состоят в существенном снижении влияния рассеяния электронов на их электрические характеристики, повышении быстродействия и уменьшении потребляемой мощности [1]. Особенно перспективными для создания элементной базы вакуумной наноэлектроники считаются наноструктуры на основе кремния. Во-первых, из-за развитой кремниевой технологии, а также подходящих эмиссионных свойств самого кремния. Однако, в настоящее время вакуумные наноструктуры еще не имеют широкого практического применения. Причины состоят в недостаточной изученности физики автоэлектронных процессов эмиссии из кремния, в том числе, при низких температурах, а также в необходимости снизить потенциальный барьер на поверхности кремния (работа выхода кремния обычно немногим больше 4 эВ).

В данной работе рассматриваются факторы, обуславливающие особенности автоэлектронной эмиссии легированного кремния n-типа при низкой температуре. К ним, в первую очередь, относится механизм проводимости, определяемый концентрацией доноров. Как установлено в работах [2, 3], в области температур 2-4 К и 30-90 К механизм проводимости кремния, легированного сурьмой при концентрации  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>, является активационным, но при этом характеризуется весьма низкой величиной энергии активации,  $\epsilon_a = 1.45-1.73$  мэВ. Это приводит к тому, что в области 30-90 К проводимость является практически металлической (величина  $\epsilon_a < kT$ ). Здесь  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура. Эти особенности связаны с наличием, так называемой,  $\epsilon_2$  – проводимости. Она определяется переносом электронов по верхней полосе примесной зоны Хаббарда, где транспорт осуществляется за счет переходов между примесными центрами, находящимися в нейтральном состоянии ( $D^0$  – состояния). Энергия

связи электрона, находящегося в синглетном спиновом состоянии на нейтральном примесном центре, мала и поэтому электроны относительно легко перемещаются по таким состояниям.

В области 2-4 К проводимость также подчиняется простому активационному закону, характеризуемому относительно малым потенциальным барьером,  $\epsilon_a/kT \approx 4$ . При росте электрического поля до 1 В/см на вольтамперной характеристике (ВАХ) возникает область отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) S-типа, характеризующаяся скачком тока при достижении порогового значения внешнего смещения. Так как характерная величина напряженности электрического поля при этом не превышает 1 В/см, то можно говорить о том, что механизм ОДС не связан с электрическим пробоем и лавинным умножением электронов, а определяется электронными кулоновскими корреляциями на D- состояниях. При достижении критической концентрации происходит уменьшение энергии связи электронов на D- состояниях, что ведет к невозможности захвата инжектированных электронов на эти состояния и соответствующему скачку тока.

Таким образом, для осуществления эффективной автоэлектронной эмиссии, обусловленной  $\epsilon_2$  – проводимостью, необходимо обеспечить совпадение энергетического уровня электронов D- состояний с подходящими уровнями поверхностных состояний кремния, т.е. создать на поверхности кремния высокую плотность состояний, энергия которых совпадает с энергией D- состояний, находящихся в его запрещенной зоне. В этом случае автоэлектронной эмиссии будет способствовать эффект резонансного туннелирования. Также можно обеспечить рост эффективности автоэлектронной эмиссии данного кремния путем осаждения 2-D кристаллов на его поверхность с подходящими эмиссионными свойствами, например, графена.

В области 2-4 К при наличии ОДС, этот эффект можно использовать для создания кремниевого автоэлектронного катода, функционирующего в импульсном режиме. Генерация импульсов тока может осуществляться путем использования области нелинейной ВАХ S-типа, содержащей три значения тока при одном и той же величине потенциала внешнего смещения. Возникающая в этом случае нестабильность ведет к генерации импульсов тока. В этом случае также необходимо обеспечить или снижение потенциального барьера на поверхности кремния, или совпадение энергетических уровней на поверхности с большой плотностью состояний с энергией D- состояний кремния.

#### Список использованных источников:

1. Han J.-W., Oh J.S., Meyyappan M. Vacuum nanoelectronics: Back to future? – Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor // Appl. Phys. Letters – 2012. – Vol.100, No.21. – P. 213505.
2. Danilyuk A.L., Trafimenko A.G., Fedotov A.K., Svito I.A., Prischepa S.L. Negative Differential Resistance in n-Type Noncompensated Silicon at Low Temperature // Appl. Phys. Letters. – 2016. – Vol. 109, No. 22. – P.222104.
3. Danilyuk A.L., Trafimenko A.G., Fedotov A.K., Svito I.A., Prischepa S.L. Low Temperature Conductivity in n-Type Noncompensated Silicon Below Insulator-Metal Transition // Advances in Condensed Matter Physics. – 2017. – Vol. 2017. – Article ID 5038462.

## ОСОБЕННОСТИ АНОДИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СИСТЕМЫ Al/V/Cu

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Щадинская Д.А.

Лозовенко А.А. – м. н. с. НИЛ 4.10

Разработана методика формирования проницаемых структур с металлическим подслоем, основанная на двухстадийном анодировании тонкопленочной системы Al/V/Cu.

В мире становится актуальными исследования нитевидных проводящих наноструктур [1, 2]. Разрабатываются методики и технологии формирования темплейтов. Одним из вариантов создания нанопроводов является синтез массивов нанопроводов в темплейтах матриц пористого анодного оксида алюминия (АОА).