

УДК 538.971, 53.097

## **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛЕНКЕ $NaAu_y$**

М.В. Кнатько, М.Н. Лапушкин

*ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»  
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26*

*Lapushkin@ms.ioffe.rssi.ru*

**Аннотация:** Исследованы процессы, протекающие в полупроводниковой пленке  $NaAu_y$  под действием внешнего электрического поля. Предложена модель, опирающаяся на свойства дырочной и электронной проводимости полупроводника.  
*Ключевые слова:* адсорбция, щелочные металлы, золото, интерметаллические соединения, термическая десорбция атомов и ионов, поверхностная ионизация.

В середине прошлого века было обнаружено существование интерметаллических соединений золото-щелочной металл, которые как было показано позднее на примере  $CsAu$  могут быть широкозонными полупроводниками. В отличие от большинства соединений золота в соединениях золото-щелочной металл золото выступает в роли аниона [1], тогда как в абсолютном большинстве соединений золото является катионом. Ряд соединений  $Me_xAu_y$  ( $Me$  – щелочной металл) могут быть ионными полупроводниками (кроме соединений лития). При этом современные расчеты [2-5] показывают, что соединения  $Me_xAu_y$  состоят не из ионов  $Me^+$  и  $Au^-$ , а представляют собой сложную суперпозицию электронной плотности, распределенной между остовами атомами золота и атомами щелочного металла. Так, например расчеты электронной структуры  $NaAu_5$  [4] и  $NaAu$  [3] показывают, что происходит сложное перераспределение электронной плотности валентных электронов с их концентрацией в области связи между атомами  $Na$  и  $Au$ . Проведенные оценки показывают, что наблюдается избыток электронной плотности вблизи  $Au$  в области связи  $\sim 0,6 \div 0,7e$  ( $e$  – заряд электрона), что означает дефицит электронной плотности около атома натрия, равный  $0,6 - 0,7e$ . Количество избыточной электронной плотности на атоме золота уменьшается с уменьшением числа атомов  $Na$  в соединении, так на один атом  $Au$  в соединении  $NaAu_5$  приходится  $0,14e$ , в соединении  $NaAu$  –  $0,30e$ . Валентная зона полупроводника сформирована  $Au 5d$  и  $Au 6s$  состояниями.

Настоящая работа продолжает цикл работ по исследованию процессов формирования ультратонких пленок полупроводника  $Me_xAu_y$  при высоких температурах [6-10], а также по изучению влияния внешних воздействий, таких как внешнее электрическое поле, световое воздействие

и радиационное облучение на характер процессов происходящих внутри и на поверхности ультратонких пленок [7-13]. Основными механизмами, определяющими эмиссионные свойства полупроводниковой пленки в этих работах, считались ионная проводимость полупроводника и поверхностная ионизация (ПИ). Предполагалось, что одновременно с созданием полупроводниковой пленки при высоких температурах происходит частичное разрушение сплава, а именно распад  $Me_xAu_y$  с переходом электрона от щелочного металла к остовым атомам золота, образование ионов щелочного металла и локализация электрона на группе атомов золота. Ион щелочного металла и отрицательный заряд могут разнонаправлено независимо друг от друга диффундировать внутри пленки, определяя диффузионные процессы обмена частиц и зарядов между поверхностью и объемом пленки. Десорбция с поверхности частиц рассматривалась в рамках представлений ПИ, а именно слет ионов определялся концентрацией щелочного металла на поверхности и работой выхода поверхности [14]. В рамках этой модели рассматривалось влияние внешних факторов на концентрацию и распределение ионов в пленке, на диффузионные процессы. При этом поверхностная концентрация щелочного металла, в отличие от классических представлений ПИ, определялась не только балансом адсорбции и десорбции частиц с поверхности, но и обменом частицами между поверхностью и объемом пленки. Однако в рамках этой модели игнорировалась вероятность образования в полупроводниковой пленке проводимости другого типа, а именно проводимости, обеспеченной  $n$  и  $p$  носителями заряда. Действительно в полупроводнике при высоких температурах определяющей является проводимость собственных носителей заряда. В силу малой массы эти носители более подвержены таким внешним воздействиям, как внешнее электрическое поле, их создание может стимулировать освещение и электронное облучение. Таким образом нет никаких оснований не принимать в рассмотрение возможность влияния этого механизма на процессы, наблюдаемые для эмиттеров, покрытых полупроводниковой пленкой  $Me_xAu_y$ .

В работах [7-10] было изучено влияние электрического поля на десорбцию ионов с поверхности пленки  $NaAu_y$ , которое объяснялось в рамках модели влияния электрического поля на диффузионные процессы ионов натрия в пленке. В настоящей работе исследовано влияние внешнего электрического поля на ток ионов натрия, десорбирующихся с поверхности пленки интерметаллида  $NaAu_y$  при их термической десорбции, и предпринята попытка обоснования наблюдаемых процессов с

позиций механизма проводимости за счет образования пар  $n$  и  $p$  носителей.

Напыление атомов  $Na$  производили на поверхность золотой ленты с чистотой 99,99. Предварительно ленту прогревали 10 часов в вакууме при  $T=1100$  К и не менее 30 часов в атмосфере кислорода при давлении  $2 \cdot 10^{-6}$  Торр. Эксперименты проводили при температуре ленты в пределах  $700 < T_t < 1200$  К в потоке натрия  $I = 10^{12} \div 10^{14}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Такая методика позволяет сформировать на поверхности золотой ленты ультратонкую пленку  $NaAu_y$  толщиной несколько десятков атомных слоев и более. Предполагается, что формирования слоя находится на начальных стадиях, при которых  $y > 2$  и может принимать не целые значения. Такое написание формулы соединения отражает тот факт, что у нас образуется соединение с дефицитом натрия. Это подтверждается фазовой диаграммой [15], из которой следует, что при  $T \sim 1000$  К невозможно получить соединения в твердой фазе с большим содержанием  $Na$ , чем в  $NaAu_2$ . Полученная пленка обладает высокой термической стабильностью в течение десятков часов при  $T=1250$  К при сохранении своих уникальных физико-химических свойств. Опыты проводили в основном в атмосфере кислорода при давлении при  $1 \div 1,5 \cdot 10^{-6}$  Торр с целью предотвращения накопления на поверхности эмиттера углеродных образований. К эмиттеру можно было прикладывать электрическое поле с напряженностью электрического поля  $E < 1000$  В/см. Направление вектора электрического поля могло меняться на  $180^\circ$ , обеспечивая либо режим вытягивания положительных ионов, образующихся на поверхности эмиттера, (тянущее поле), либо «запирания» их на поверхности, т.е. препятствуя десорбции положительных ионов с поверхности (запирающее поле).

Для определения влияния электрического поля на эмиссионные свойства ультратонкой пленки  $NaAu_y$  на поверхности золотой ленты, покрытой плёнкой сплава  $NaAu_y$ , на нее направлялся поток атомов  $Na$  не более  $\nu = 10^{12}$  атом/см<sup>2</sup> в тянущем и запирающем электрическом поле напряжённостью  $E_d = 125$  В/см и измерялся поток ионов  $Na^+$  при  $T = 1150$  К.

Включение тянущего электрического поля приводит появлению тока эмиссии положительных ионов натрия  $I(t)$ . После достижения ионным током стационарного значения  $I_{st}$  в момент времени  $t = 10$  с включали задерживающее поле, что приводило к прекращению ионного тока. После выдержки системы в запирающем поле в течение времени  $\Delta t = 2 \div 1024$  с при продолжении напыления потока атомов натрия на поверхность включалось тянущее поле. Включение тянущего поля после экспозиции в

запирающем поле за время  $\Delta t$  приводило к резкому всплеску тока  $Na^+$ . Так, например, включение тянущего поля при  $t = 710$  с приводит к возрастанию ионного тока до значений в 2 раза превышающих  $I_{st}$ . Кинетика достижения максимального значения тока определялась постоянной времени регистрирующей аппаратуры. С момента достижения максимального значения тока наблюдался его спад до минимума, а затем постепенный рост до  $I_{st}$ . Величина всплеска ионного тока, глубина минимума и время достижения  $I_{st}$  зависели от  $\Delta t$  и  $E_d$ .

Рассмотрим происходящие при этом процессы. В предварительно созданном полупроводниковом слое  $NaAu_y$  на  $Au$  при больших температурах  $T = 1150$  К можно с большой долей уверенности считать, что происходит образование дырок и электронов. При этом концентрация дырок и электронов одинакова. В стационарных условиях наблюдается равновесное распределение положительных зарядов  $\rho_+(z)$  дырок,  $z$  – координата по нормали от поверхности вглубь слоя, и электронов  $\rho_-(z)$  в слое  $NaAu_y$ . Включение тянущего поля приводит к движению дырок и электронов под действием внешнего электрического поля в полупроводнике, приводя к увеличению  $\rho_+(z)$  вблизи поверхности, а  $\rho_-(z)$  на границе раздела металл/полупроводник и изгибу зон на границах полупроводникового слоя. Дошедшая до границы раздела  $NaAu_y$  / вакуум дырка может принимать участие в поверхностной ионизации десорбирующегося натрия, за счет повышения эффективности его ионизации при нейтрализации дырки валентным электроном атома  $Na$  и образовании иона  $Na^+$ .

Включение запирающего поля приводит к перераспределению пространственного распределения  $\rho_+(z)$  и  $\rho_-(z)$  в слое  $NaAu_y$  под действием внешнего электрического поля. Дырки будут концентрироваться в области границы раздела металл /  $NaAu_y$ , а электроны в области границы раздела  $NaAu_y$  / вакуум. Кроме того, включение запирающего поля приводит к росту концентрации натрия на поверхности слоя. Увеличение концентрации натрия на поверхности при запирающем слое обусловлено, во-первых, за счет прекращения десорбции ионов  $Na^+$ , а, во-вторых, за счет образования дополнительных локальных адсорбционных центров в виде локализованных на поверхности электронов. Это увеличение концентрации натрия на поверхности может происходить до достижения нового равновесного покрытия.

Подача вытягивающего поля после запирающего приводит к открытию канала десорбции ионов натрия и к ликвидации дополнительных

адсорбционных центров, за счет оттягивания электронов их образующих или к их нейтрализации дырками в тянущем ионы поле. Это приводит к формированию вспышки ионного тока сразу после включения вытягивающего напряжения. Падение ионного тока обеспечено уменьшением концентрации натрия на поверхности. Последующий постепенный рост ионного тока до стационарного значения  $I(t)$  связан с постепенным нарастанием концентрации дырок около границы раздела  $NaAu_y$  / вакуум и, следовательно, увеличением эффективности ионизации десорбирующегося натрия. Электроны постепенно концентрируются на границе металл /  $NaAu_y$ .

Изменение ионного тока  $I(t)$  при подаче вытягивающего поля (в момент  $t = 710$  с на рис. 1) можно описать двумя экспонентами: возрастающей и спадающей. Возрастающая экспонента отражает процессы восстановления распределения положительных зарядов  $\rho_+(z)$  искаженного подачей запирающего поля.

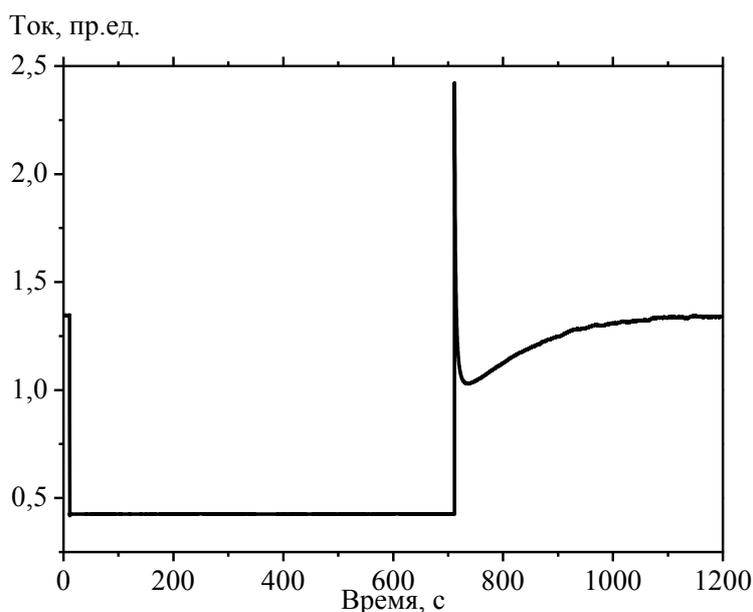


Рис. 1. Зависимость тока ионов  $Na^+$  от времени при включении запирающего поля на 700 с.

Спадающая же экспонента отражает сумму процессов: уменьшение концентрации натрия на поверхности, за счет включения канала десорбции ионов; увеличение эффективности ионизации натрия за счет всплывания дырок на поверхность; увеличение работы выхода  $\phi$  при уменьшении концентрации частиц на поверхности. Последнее обусловлено тем, что для металлов и полупроводников наблюдается линейная зависимость

изменения работы выхода  $\varphi$  от покрытия поверхности щелочным металлом [16]. В нашем случае зависимость  $\varphi(t)$  отражает временную зависимость  $\varphi$  от концентрации адсорбата, изменяющуюся со временем. Количество адсорбированных атомов натрия  $N(t)$  на поверхности после подачи вытягивающего поля определяется суммой накопленных за время действия запирающего поля атомов  $N_0$ , дополнительным количеством адсорбирующихся атомов за счет потока атомов натрия на поверхность  $a(t)$  и слетающими атомами и ионами  $n(t)$  за время  $t$  за счет механизма ПИ:

$$n(t) = \int_0^t \left[ (N_0 + a(t))(1 - \beta_0) e^{-\frac{\varphi(t)-V}{kT}} \right] \beta_+ dt, \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $V$  – потенциал ионизации атома  $Na$ ,  $\beta_+, \beta_0$  – вероятность слета ионов и атомов, соответственно. Тогда для  $N(t)$  можно записать:

$$N(t) = (N_0 + a(t))(1 - \beta_0) - \int_0^t \left[ (N_0 + a(t))(1 - \beta_0) e^{-\frac{\varphi(t)-V}{kT}} \right] \beta_+ dt. \quad (2)$$

Тогда для числа слетающих ионов образовавшихся в процессе ПИ можно написать следующее уравнение:

$$I(t) = \left[ (N_0 + a(t))(1 - \beta_0) - \int_0^t \left[ (N_0 + a(t))(1 - \beta_0) e^{-\frac{\varphi(t)-V}{kT}} \right] \beta_+ dt \right] \beta_+ e^{-\frac{\varphi(t)-V}{kT}}. \quad (3)$$

При написании уравнения считалось, что теплоты слета ионов и атомов с поверхности не изменялись во времени.

Площадь «вспышки»  $S(\Delta t)$  ограничена участком роста ионного тока и спадающей экспоненциальной зависимостью, которая пропорциональна количеству атомов  $Na$ , накопленного за время подачи запирающего напряжения. По площади вспышки можно оценить количество вылетевших ионов за время вспышки и соответственно оценить количество слетевших ионов натрия. Площадь под кривой  $I(t_d)$  от  $t_d = 710$  до  $t_d = t_{st} = 1140$  с обозначим как площадь «вспышки»  $S(\Delta t)$ . Тогда для времени задержки  $\Delta t = 700$  с за время вспышки с поверхности вылетает порядка  $8 \cdot 10^{12}$  ионов/см<sup>2</sup>, что приводит к формальному покрытию ионов  $\sim 0,015$  монослоя (монослой атомов натрия составляет величину  $5 \cdot 10^{14}$  атомов/см<sup>2</sup>). При этом за первую секунду вспышки слетает до 10% процентов всех десорбирующихся ионов. Зависимость площади «вспышки» от времени  $\Delta t$  действия запирающего поля  $E_d$  приведена на рис. 2.

Видно, что максимальное количество накопленного атомов  $Na$  на

поверхности при величине запирающего поля  $V = 125$  В наблюдается при  $\Delta t = 75$  с. Падение  $S(\Delta t)$  после максимума связано с большим покрытием  $Na$  на поверхности при этих временах запирания. То есть, начиная с этого покрытия дальнейшее его увеличение, приводит к уменьшению работы выхода поверхности и, следовательно, к уменьшению вероятности ионизации атомов  $Na$  на поверхности  $NaAu_y$ . Уравнение (3) достаточно хорошо описывает наблюдаемые в эксперименте процессы. Отметим также, что на все вышеуказанные процессы могут также влиять: диффузия  $Na$  вглубь пленки с его включением в сплав  $NaAu_y$ ; образование и диффузия ионов  $Na^+$ .

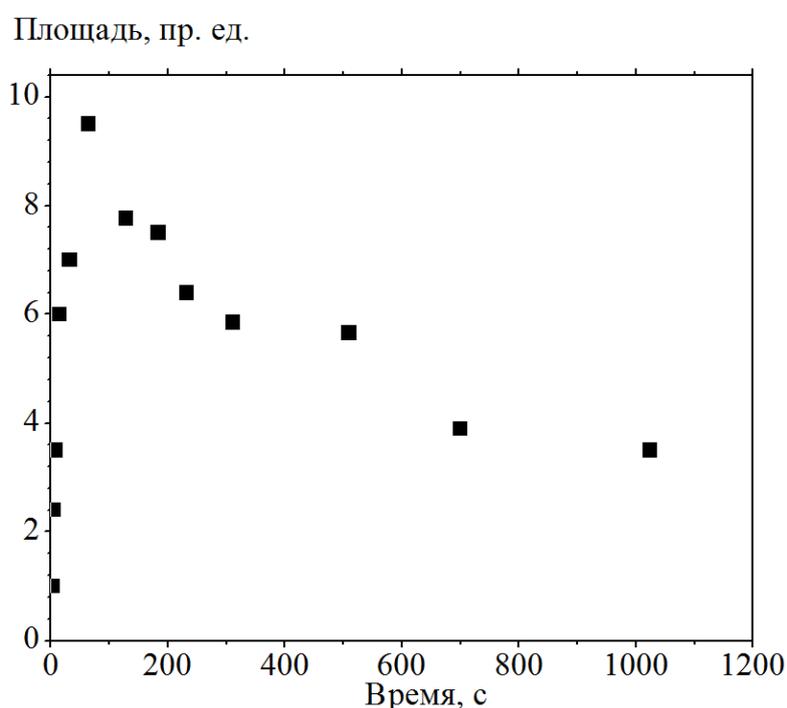


Рис. 2. Зависимость площади вспышки от времени запирания.

Предложена новая модель процессов, происходящих в тонких пленках  $NaAu_y$ , выращенных на поверхности  $Au$ , под действием внешнего электрического поля. Показана роль собственных носителей заряда в пленке  $NaAu_y$  на процессы отклика пленки на воздействие внешнего электрического поля и роль дырок на процесс ионизации атомов  $Na$  на поверхности  $NaAu_y$ .

### Библиографический список:

1. **Jansen, M.** The chemistry of gold as an anion / M. Jansen // Chemical Society Reviews. 2008. – V. 37. – I. 9. – P. 1826-1835.

2. **Aycibin, M.** Physical properties of *RbAu* compound / M. Aycibin, E. K. Dogan, S.E. Gulebaglan, M. N. Secuk, B. Erdinc, H. Akkus // *Computational Condensed Matter*. – 2014. – V. 1. – P. 32-37.
3. **Grosch, G.H.** Chemical trends in gold alkali alloys: A density functional theory study on stability and charge transfer Part I: Gold alkali alloys of the formula *MAu* / G.H. Grosch, K.-J. Range // *Journal of Alloys and Compounds*. – 1996. – V. 233. – I. 1-2. – P. 30-38.
4. **Grosch, G.H.** Chemical trends in gold alkali alloys: A DFT- study on stability and charge transfer Part I: Gold alkali alloys of the formula *MAu<sub>5</sub>* / G.H. Grosch, K.-J. Range // *Journal of Alloys and Compounds*. – 1996. – V. 233. – I. 1-2. – P. 39-43.
5. **Kwolek, E.J.** The (111) Surface of *NaAu<sub>2</sub>*: Structure, Composition, and Stability / E.J. Kwolek, R. Widmer, O. Gröning, O. Deniz, H. Walen, C.D. Yuen, W. Huang, D.L. Schlagel, M. Wallingford, P.A. Thiel // *Inorganic Chemistry*. – 2015. – V. 54. – I. 3. – P. 1159-1164.
6. **Зандберг, Э.Я.** Фотостимуляция диффузии атомов щелочных металлов в приповерхностных слоях золота / Э.Я. Зандберг, М.В. Кнатько, В.И. Палеев, И.Д. Пелехатый, М.М. Суших // *Письма в Журнал технической физики*. – 1995. – Т. 21. – Вып. 19. – С. 15-20.
7. **Кнатько, М.В.** Управление термической ионизацией с помощью электропереноса катионов щелочных металлов / М.В. Кнатько, М.Н. Лапушкин, В.И. Палеев // *Письма в Журнал технической физики*. – 2005. – Т. 31. – Вып. 8. – С. 19-23.
8. **Кнатько, М.В.** Особенности термостимулированной десорбции ионов *Na<sup>+</sup>* и *Cs<sup>+</sup>* с пленки сплава *NaAu* на *Au* / М.В. Кнатько, М.Н. Лапушкин, В.И. Палеев // *Журнал технической физики*. – 2005. – Т. 74. – Вып. 4. – С. 109-113.
9. **Кнатько, М.В.** Влияние электрического поля на эмиссию ионов *Na* из поверхностного сплава *NaAu* / М.В. Кнатько, М.Н. Лапушкин // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2013. – Т. 77. – №. 3. – С. 379-382.
10. **Кнатько, М.В.** Пороговые процессы эмиссии ионов натрия из поверхностного сплава *NaAu* / М.В. Кнатько, М.Н. Лапушкин // *Письма в Журнал технической физики*. – 2015. – Т. 41. – Вып. 8. – С. 43-49.
11. **Агеев, В.Н.** Начальные стадии взаимодействия натрия и цезия с золотом / В.Н. Агеев, Е.Ю. Афанасьева // *Физика твердого тела*. – 2006. – Т. 48. – Вып. 12. – С. 2217-2222.
12. **Ageev, V.N.** Electron-stimulated desorption of cesium atoms from cesium layers adsorbed on gold-covered tungsten / V.N. Ageev, Yu.A. Kuznetsov, N.D. Potekhina // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2010. – V. 22. – I. 8. – P. 084005-1-084005-9.
13. **Агеев, В.Н.** Использование электронно-стимулированной десорбции в изучении адсорбированных слоев / В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Н.Д. Потехина // *Журнал технической физики*. – 2013. – Т. 83. – Вып. 6. – С. 85-91.
14. **Зандберг, Э.Я.** Поверхностная ионизация / Э.Я. Зандберг, Н.И. Ионов. – М.: Наука, 1969. – 432 с
15. **Pelton, A.D.** The *Au–Li* (Gold-Lithium) system / A.D. Pelton // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. – 1986. – V. 7. – I. 3. – P. 228-231.
16. **Фоменко, В.С.** Эмиссионные свойства металлов материалов / В.С. Фоменко. – Киев: Наукова Думка, 1981. – 340 с.