

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ РАБОТЫ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩЕГО ТОНКОПЛЁНОЧНОГО ДИОДА НА ОСНОВЕ СЕЛЕНА

К.И. Кляус, С.И. Коняев, Э.В. Шапочанская
(Новосибирск)

Плёночный диод на основе селена со структурой металл-селен-металл имеет S-образную вольтамперную характеристику с гистерезисом по току в прямом направлении, а в обратном направлении - характеристику либо S-образного типа, либо соответствующую вентеровскому пробое. В работе [1] приведены параметры электрических характеристик тонкоплёночного переключающего диода и описана методика их измерений.

В настоящей работе сообщаются результаты исследования влияния на параметры вольтамперной характеристики диода толщины плёнки селена, напряжений, температуры.

На основе экспериментальных данных предложено одно из возможных объяснений механизма работы диода.

В качестве электродов был опробован ряд металлов: Ag, In, Al, Pt, Mg, Zn, Au. Переключающие характеристики получались в том случае, когда металл, служащий положительным электродом, хорошо диффундирует в селен (Ag, Cu). Наиболее хорошо воспроизводимые переключающие характеристики получены с электродами из серебра и алюминия. Коэффициент диффузии серебра в селен равен 10^{-8} см²/сек [2].

Нижеследующие данные приведены для прямой ветви вольтамперной характеристики диодов со структурой серебро-селен-алюминий. За прямое направление принято такое, когда "плюс" источника напряжения приложен к серебряному электроду.

Толщина пленки селена изменялась от 10^3 Å до $3 \cdot 10^4$ Å. Для получения электродов из серебра брались навески от 2 до 200 мг. Образцы получали в одинаковых технологических условиях: оставались постоянно расстояние между испарителем и подложкой, тип испарителя, температура подложки и т.д.

Качественно прямая ветвь вольтамперной характеристики диода приведена на рис. 1,

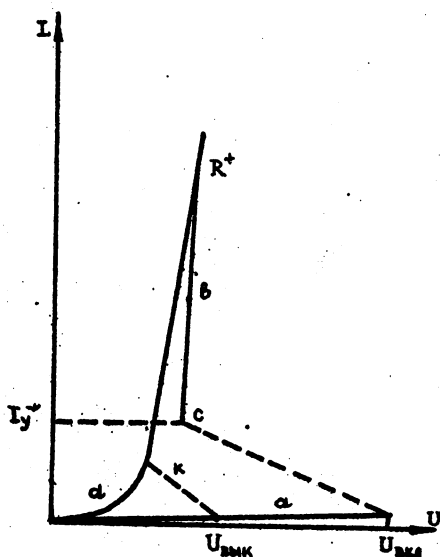


Рис. 1. Вид прямой ветви ВАХ диода.

где $U_{вкл}$ - напряжение включения диода (напряжение, при котором диод из состояния низкой проводимости переходит в состояние высокой проводимости);
 R^+ - положительное дифференциальное сопротивление диода в состоянии высокой проводимости;
 $I_{уд}$ - ток удержания;

$U_{\text{вкл}}$ — напряжение выключения (напряжение, при котором диод переходит из состояния высокой проводимости в состояние низкой проводимости).

Все ниже приведенные параметры диодов снимались при увеличении подаваемого напряжения от нуля до максимума за 2 + 3 секунды и представляют собой усредненные значения. Усреднение проводилось по 50 + 100 измерениям каждого параметра характеристики. Для идентичных образцов также усредненные значения хорошо воспроизводятся.

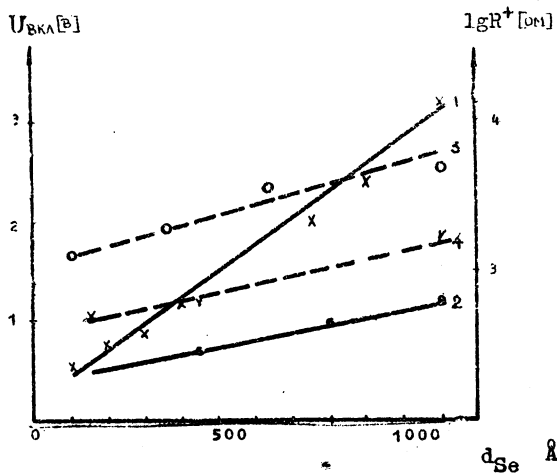
Параметры диодов имеют некоторый разброс $[I]$, но наибольший по напряжению включения, примерно, в два раза. При повышении частоты переключений диода этот разброс уменьшается $[I]$. При частоте примерно 50 кГц диод перестает выключаться. Для того чтобы он выключался, необходимо после каждого включения подавать отрицательный импульс напряжения.

Параметры вольтамперной характеристики зависят от количественного соотношения серебра и селена. От этого в основном зависят две величины: напряжение включения ($U_{\text{вкл}}$) и дифференциальное сопротивление (R^+).

С увеличением толщины селена при неизменном количестве серебра напряжение включения увеличивается, увеличивается и R^+ (рис. 2а). С увеличением количества серебра при неизменной толщине плёнки селена напряжение включения и дифференциальное сопротивление уменьшаются (рис. 2б); при большом количестве серебра (когда весовое соотношение между серебром и селеном достаточно для образования селенистого серебра Ag_2Se) обе кривые на рис. 2б стремятся к насыщению. Напряжение включения, соответствующее насыщению, примерно равно 0,5 в. Следует отметить, что среди исследуемых диодов практически не встречаются образцы с напряжением включения меньше 0,45 в.

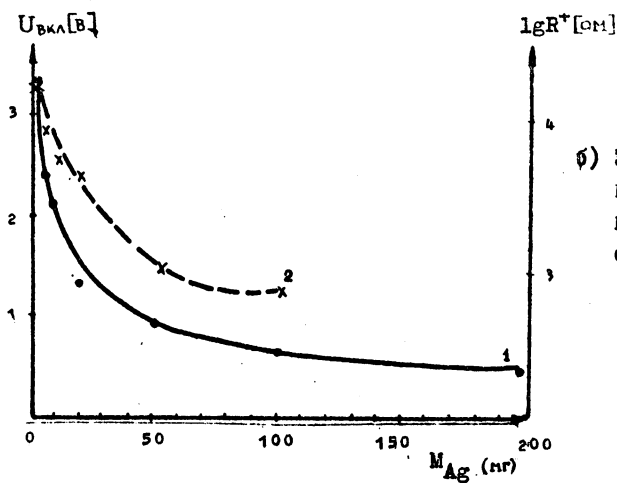
Величина напряжения, при котором диод из состояния низкой проводимости переходит в состояние высокой проводимости, зависит от амплитуды прикладываемого напряжения и времени его действия на диод.

На рис. 3 приведены кривые зависимости времени нахождения диода в состоянии низкой проводимости (участок "а" на рис. 1) до перехода диода в состояние высокой проводимости (участок "б" на рис. 1) от величины прикладываемого к диоду напряжения. При уменьшении напряжения, подаваемого на диод,



а) Зависимость $U_{\text{вкл}}$ (1,2) и $\lg R^+$ (3,4) от толщины пленки селена.

1,3 — навески селена 50 мг;
2,4 — навески селена 100 мг.



б) Зависимость $U_{\text{вкл}}$ (1) и $\lg R^+$ (2) от навески серебра, толщина селена ≈ 6500 Å

Рис. 2.

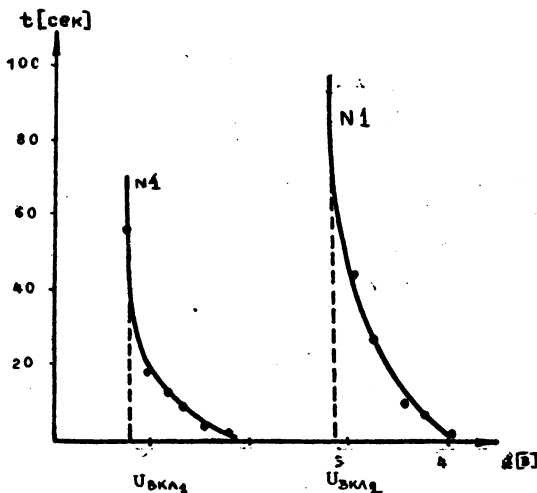


Рис. 3. Зависимость времени нахождения диода в состоянии низкой проводимости от положительного смещения на диоде. Толщина селена $\approx 6500 \text{ \AA}$; навеска серебра для № I - 10 мг, для № 4 - 200 мг.

время до включения диода увеличивается; кривые рис. 3 имеют насыщение при некотором напряжении, а при меньшем напряжении диод практически не включается. Напряжение, соответствующее насыщению, можно считать пороговым напряжением включения в статике. Зависимости на рис. 3 приведены для двух образцов с разным содержанием серебра при одинаковой толщине пленки селена. С увеличением количества серебра (образец 4) пороговое напряжение включения уменьшается.

На рис. 4 приведена зависимость напряжения включения от величины предварительно прикладываемого к диоду отрицательного напряжения U_- . После действия на диод отрицательного импульса напряжение $U_{вкл}$ возрастает, но после однократного включения диода последующее напряжение включения становится равным первоначальному значению, которое было до приложения отрицательного напряжения.

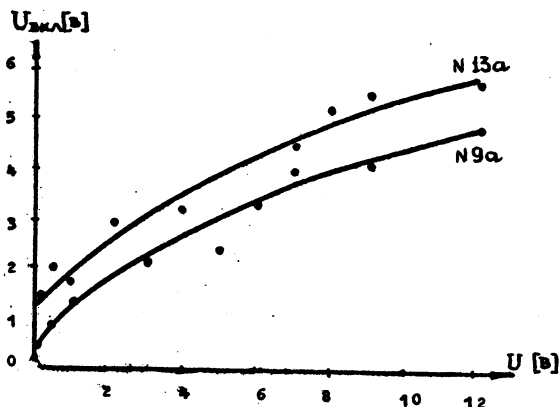


Рис. 4. Зависимость $U_{\text{вкл}}$ от обратного смещения.

№ 9а. Толщина селена $\approx 5000 \text{ \AA}$; навеска серебра - 100 мг.

№ 13а. Толщина селена $\approx 6500 \text{ \AA}$; навеска серебра - 50 мг.

Ток через включенный диод на участке высокой проводимости при изменении температуры практически не меняется. С понижением температуры напряжение включения падает (рис. 5), а при

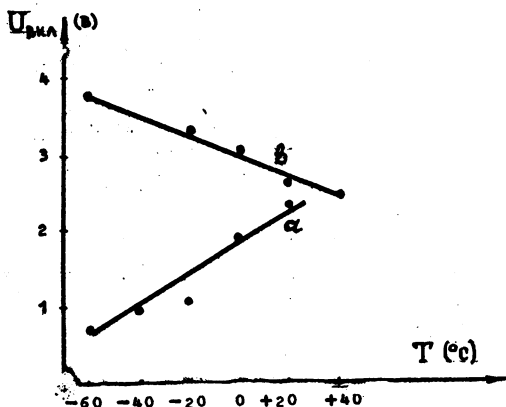


Рис. 5. Зависимость напряжения включения от температуры. Толщина селена $\approx 4500 \text{ \AA}$; навеска серебра - 50 мг.

а) $U_- = 0 \text{ В}$; б) $U_- = 5 \text{ В}$.

температуре около 153°K диод после однократного включения перестаёт выключаться. Для выключения необходимо подать на диод отрицательное напряжение (рис. 6), либо выдерживать некоторое

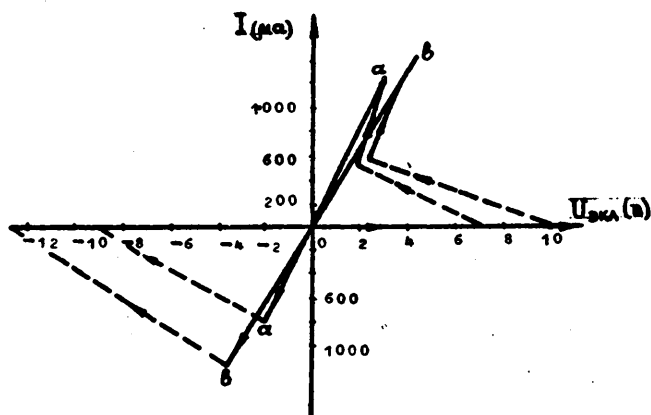


Рис. 6. Вольтамперные характеристики диода при охлаждении.
а) $t = -130^{\circ}\text{C}$; б) $t = -150^{\circ}\text{C}$. Толщина селена $\approx 4500 \text{ \AA}$, навеска серебра - 20 мг.

время без напряжения. Чем ниже температура, тем требуется более длительная временная выдержка или большее отрицательное напряжение.

Если перед каждым включением на диод подавать отрицательное напряжение U_- , то напряжение включения с понижением температуры растёт (рис. 5, кривая "з"). При повышении температуры до значений больших 293°K на обратном ходе характеристики диода чаще наблюдается участок отрицательного сопротивления (участок "к" на рис. 1), а также увеличивается напряжение включения.

Ток через диод на участке низкой проводимости от образца к образцу колеблется в пределах $10^{-11} + 10^{-13} \text{ а}$.

Ёмкостные измерения показали, что ёмкость диода до включения от прямого и обратного смещения практически не зависит. Величина удельной ёмкости для различных толщин слоя селена изменяется от 40 до 500 пф/мм². От количества серебра при постоянной толщине селена ёмкость зависит слабо, а с увеличением толщины селена падает.

Изложенные выше экспериментальные результаты можно интерпретировать, если предположить перемещение ионов серебра в селене под действием электрического поля.

Ионы серебра в селене могут образовываться в результате химической реакции между селеном и серебром [4], частично же серебро в селен может попасть в виде атомов, которые служат ловушками для дырок, что также является дополнительной причиной образования ионов серебра в селене.

Под действием внешнего электрического поля ионы серебра могут перемещаться в селене [5,6] в зависимости от направления этого поля. Перемещение их наиболее вероятно по дефектам структуры селена, что будет приводить к образованию отдельных сильно легированных каналов, по которым может проходить ток. Наличие подобных каналов наблюдали в работе [5] при перемещении серебра под действием электрического поля в аморфном и кристаллическом кварце, в селене же наблюдали перемещение ионов таллия под действием поля [6].

При подаче на диод внешнего напряжения в прямом направлении происходит расширение сильно легированной области в селене за счет перемещения ионов серебра в сторону алюминиевого электрода. Перемещение ионов серебра идёт, видимо, до тех пор, пока на каком-то участке толщина селена становится такой, что внешнее падение напряжения достаточно для обратимого пробоя (максимум напряжённости поля будет в приконтактной области алюминия, где слой селена не имеет включений серебра). В момент пробоя может происходить обогащение пробитого участка ионами серебра, тогда напряжение на диоде падает, но диод не выключается, поскольку ток теперь может идти по участкам сильно легированного серебром селена, что и даёт участок отрицательного сопротивления на вольтамперной характеристике.

Возможность прохождения тока по отдельным микроучасткам (каналам) подтверждает независимость параметров вольтамперной характеристики от площади электродов.

При приложении к диоду напряжения обратной полярности, ионы серебра будут "вытягиваться" из селена в приконтактной области. Аналогичная картина возможна при отсутствии внешнего напряжения на диоде за счет внутреннего поля, образующегося в результате наличия контактной разности потенциалов и имеющего обратное направление внешнему напряжению включения. Напряженность этого поля в тонкопленочных конструкциях может быть значительной [7]. Перемещением серебра под действием поля можно объяснить увеличение напряжения включения после предварительного приложения отрицательного напряжения к диоду или после некоторой выдержки без подачи внешнего напряжения.

Независимость тока диода, находящегося в состоянии высокой проводимости, от температуры говорит о металлическом характере проводимости. При понижении температуры до 153°K подвижность ионов серебра, видимо, значительно уменьшается, что приводит к появлению вольтамперной характеристики, представленной на рис. 6.

Явления в приконтактной области энергетически можно представить следующим образом. Известно, что примеси могут образовывать целую примесную зону, что особенно характерно для тонких пленок [8]. Тогда при пробое приконтактного слоя селена происходит резкое увеличение примеси серебра, что приводит к существенному уменьшению ширины запрещенной зоны в селене, благодаря чему возникает проводимость почти без активации. При повышении температуры подвижность ионов серебра возрастает, что приводит к более быстрому их "рассасыванию" в области пробоя приконтактного слоя, что вероятно и обуславливает появление участка отрицательного сопротивления "к" на рис. 1. При понижении температуры наблюдается обратная картина, т.е. диод не выключается, что можно объяснить "замораживанием" ионов серебра в приконтактном слое селена.

Гистерезис тока вольтамперной характеристики частично может быть обусловлен инерционностью ионов серебра, которые не успевают следовать за изменением поля.

Выяснение механизма работы тонкопленочного диода на основе селена требует дополнительных исследований. Предложенный механизм работы диода, конечно, нуждается в дополнительных экспериментальных подтверждениях и количественных оценках.

Авторы благодарны Э.Г. Фоминой и Ю.Л. Шиманскому за изготовление образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.И. Коняев, А.И. Мишин. Вычислительные системы, "Вычислительные системы", изд-во "Наука", № 26, 1967.
2. Б.И. Болтакс. Диффузия в полупроводниках. М., Физматгиз, 1961.
3. В.П. Счастливый, Д.М. Чижиков. Селен и селениды. М., Изд-во "Наука", 1964.
4. V. Zorll. Annal der Physik. 1955, Bd.16, N 6, S.58.

И.Е. Балыгин, ФТТ, т. III, в. I, стр. 156, 1961.

Н.И. Ибрагимов, А.А. Кулиев. ФТТ, т. 8, в. II, стр. 3830, 1961.

I. Simmons. Phys. Rev. Letters, 1963, vol. 10, N 1.

Физика твердого тела. М., Изд-во "Наука", 1965.