

О МЕХАНИЗМЕ РАБОТЫ ДИОДНОГО СТАБИЛИЗАТОРА ТОКА

Добровольский В. Н., Винославский М. Н., Павлюк С. П.,
Коломицкий Н. Г.

Приведены новые результаты экспериментального исследования диодных стабилизаторов тока, которые не могут быть объяснены ранее предлагавшимися механизмами. Из сопоставления этих результатов с данными исследований инжекционных эффектов в неоднородно разогретых полупроводниках следует, что в стабилизации тока основную роль играют неоднородный разогрев диода и возникающая из-за этого экстракция носителей заряда из части объема полупроводника.

В литературе (см. [1] и ссылки в ней) высказывались различные соображения относительно механизма работы диодного стабилизатора тока [2]. Основной частью этого прибора является кристалл кремния или германия, на противоположных поверхностях которого созданы омические контакты K_1 и K_2 (рис. 1, а). Размер контакта K_2 мал, и под ним реализуется большая напряженность электрического поля E . Объяснить стабилизацию тока нетрудно, когда E столь велика, что дрейфовая скорость носителей заряда насыщается. Однако стабилизация начинается при меньших полях, и это заставляет искать иные причины ее возникновения. Так, в [3] она объясняется ограничением тока пространственным зарядом, а в [1, 4] — уменьшением подвижности электронов из-за Джоулева разогрева кристалла.

В настоящей работе описаны новые результаты исследования стабилизаторов тока, результаты которых не могут быть объяснены только в рамках названных механизмов. Из сопоставления наших данных с данными [5-8] следует, что работа стабилизатора определяется в основном инжекционными эффектами, возникающими при протекании тока через неоднородно разогретый полупроводник.

1. Использовались стабилизаторы, подобные описанным в работе [3]. Они изготавливались из пластины монокристаллического кремния n -типа с удельным сопротивлением $0.5 \div 4.5$ Ом·см, толщиной $350 \div 400$ мкм и имели форму квадрата площадью $S = 1.5 \times 1.5$ мм. Малый контакт представлял собой n^+ -слой, полученный имплантацией донорной примеси, поверх которого по стандартной технологии нанесено трехслойное покрытие Ti—Ni—Au. Его диаметр $d = 10 \div 40$ мкм. Большой контакт создавался нанесением указанного покрытия на всю противоположную поверхность пластины. Сопротивление диода полностью определялось малым контактом.

На диод подавались одиночные прямоугольные импульсы напряжения с амплитудой U и снимались осциллограммы тока I (рис. 1, в). При $I > 0$ ($U > 0$) ток протекает от большого контакта к малому, при $I < 0$ — в обратном направлении. Зависимость стационарного тока I_0 от U — вольтамперная характеристика (ВАХ) — приведена на рис. 1, б (цифры у экспериментальных точек — номера осциллограмм, которые реализовались при получении соответствующих значений I_0). Подчеркнем, что ВАХ в интервале от -0.6 до 0.7 В была линейной. Униполярность, причина которой обсуждается дальше, проявлялась только при больших напряжениях.

2. Независимость I_0 от U реализуется при $U > 0$. Уже одно это не позволяет объяснить стабилизацию тока лишь насыщением дрейфовой скорости либо

простым увеличением сопротивления образца из-за Джоулева разогрева кристалла и уменьшения подвижности электронов, так как оба этих эффекта не зависят от направления тока. С другой стороны, из сопоставления осциллограмм тока со стационарной ВАХ видно, что не зависящие от U значения I_0 устанавливаются только после возникновения на осциллограмме пика тока с длительностью τ_n . Можно предположить, что в диоде за время τ_n происходят какие-то изменения: появляется пик, после чего диод приобретает способность стабили-

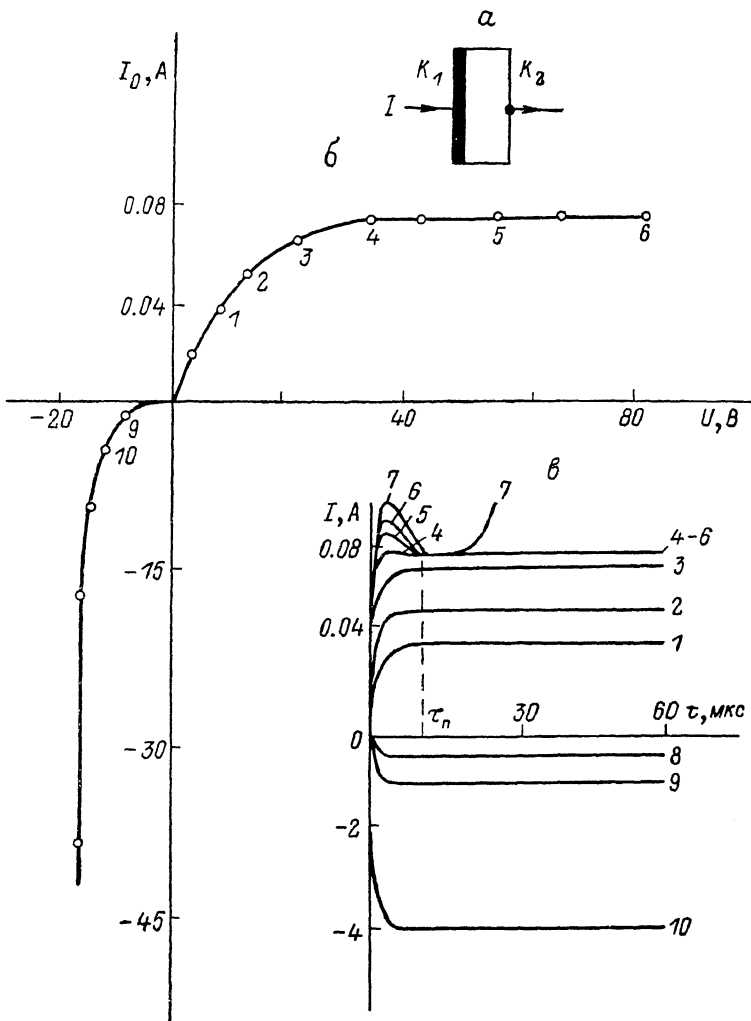


Рис. 1. Стационарная ВАХ (б) диодного стабилизатора (а) и осциллограммы тока I через него (в) при различных напряжениях U .

б) цифры у экспериментальных точек соответствуют осциллограммам в; е) U , В: 1 — 5, 2 — 8, 3 — 20, 4 — 26, 5 — 50, 6 — 75, 7 — 80, 8 — —6, 9 — —9.5, 10 — —14.4. Удельное сопротивление материала диода 0.5 Ом·см, $d=20$ мкм.

зировать ток. Поскольку τ_n на порядки больше времени диэлектрической релаксации в материале диода, этим изменением не может быть возникновение ограничивающего ток пространственного заряда. Значительная величина τ_n позволяет думать, что этим изменением является Джоулев разогрев части кристалла, примыкающей к малому контакту, где плотность тока j наибольшая. Оценка времени разогрева τ и повышения температуры ΔT по формулам

$$\tau \approx \frac{d^2}{\sqrt{\chi/c_p}}, \quad \Delta T \approx jE \frac{\tau}{c_p} \approx \frac{I}{d^2} \frac{U}{d} \frac{\tau}{c_p}$$

(α — коэффициент теплопроводности, c — удельная теплоемкость, ρ — плотность, $\sqrt{\alpha/c\rho}$ — коэффициент тепловой диффузии [9]) дает $\tau \approx 10$ мкс, которое близко к τ_n , и $\Delta T \approx 500$ К одного порядка со значением, полученным в расчетах [4]. Как уже отмечалось [3], простое увеличение сопротивления полупроводника в результате его разогрева не может служить объяснением стабилизации тока. Проведенная оценка ΔT в дополнение к [3] дает основание утверждать, что такое объяснение не правомочно еще и потому, что при достигаемых ΔT сильно увеличиваются концентрации электронов n и дырок p из-за их термической генерации.

Объяснением стабилизации тока в результате разогрева образца, по нашему мнению, является следующее. Разогрев и термическая генерация электронов и дырок приводят к возникновению у самого контакта электронно-дырочной плазмы, которая находится в температурном поле с T , спадающей в глубь полупроводника с градиентом порядка $\Delta T/d \approx 10^5$ град/см. После возникновения за время порядка τ такой ситуации концентрации n и p у контакта и I определяются закономерности протекания тока через электронно-дырочную плазму, находящуюся в неоднородном температурном поле. Эти закономерности изучались в ряде работ (см. [5-8] и ссылки в [7]). Согласно [7], в рассматриваемых условиях при I , протекающем в направлении увеличения T ($I > 0$), механизм изменения n и p , названный b -дрейфом, приводит к экстракции электронов и дырок из области градиента температуры. При достаточно большом U скорость их экстракции превышает скорость термической генерации и ток насыщается. Ток обратного направления ($I < 0$) приводит к увеличению n , p и резкому росту I_0 . Сказанное объясняет ВАХ (рис. 1, б).

b -Дрейф, уменьшающий n и p , включается после существенного разогрева образца, а до этого доминирует их термическая генерация и ток растет, чем объясняется возникновение пика тока. Подобный пик наблюдался и в работах [5-8], где плазма инжектировалась через p - n -переход. При достаточно большой амплитуде U разогрев приводит к столь сильной генерации носителей заряда, что b -дрейф не успевает их экстрагировать. В этом случае после пика тока и участка независимости I от времени ток растет и диод разрушается (рис. 1, в, осциллограмма 7). Подобное наблюдалось на образцах германия в [5].

3. Все эффекты на диодных стабилизаторах тока в работах [5-8] наблюдались на образцах германия и кремния. Там их природа была установлена с помощью специальных измерений в различные моменты времени распределений в образцах T , n и p , что в диодных стабилизаторах трудно сделать. Разогревы ΔT в образцах германия [7] были того же порядка, что и полученные в оценках нашей работы, а градиент T был значительно меньше. Одно из отличий условий исследований [5-7] от условий настоящей работы состоит в следующем. В [5-7] реализовалось одномерное течение тока, а неоднородный разогрев возник из-за неоднородного распределения инжектированных носителей заряда. В диодном стабилизаторе тока неоднородность существенно обусловлена растеканием тока. Однако это отличие не является принципиальным. В связи с ним отметим, что в работе [8] на образцах трапециевидальной формы наблюдалось влияние растекания тока, подобное имеющему место в диодном стабилизаторе, на температурное поле, концентрацию носителей заряда и ток.

Определенным тестом, свидетельствующим о справедливости предложенного объяснения стабилизации тока, может быть результат следующих экспериментов. Согласно развиваемой точке зрения, стабилизация связана с возникновением температурного поля и протеканием через это поле тока в направлении увеличения T . Тогда при $I > 0$ следует ожидать, что созданный внешними источниками тепла дополнительный перепад температуры от малого контакта к большому должен ускорять переход диода в состояние, когда он начнет стабилизировать, а перепад в противоположном направлении — устранять стабилизацию. Такие эффекты действительно наблюдались.

Приведенные на рис. 2 осциллограммы I , I' и I'' сняты в тех же условиях, что и осциллограммы и кривые, приведенные на рис. 1. Осциллограммы 2, 2' и кривая 2'' получены при дополнительном внешнем разогреве поверхности диода с малым контактом. С этой целью, как и в работе [7], к поверхности прижимался импульсный нагреватель, температура которого во время измерения

увеличивалась на 700 К. Видно, что внешний разогрев ускоряет переход диода в состояние стабилизации. При этом пик тока и ток насыщения I_0 уменьшаются. Это можно объяснить тем, что благодаря внешнему разогреву экстрагирующий носители заряда градиент T больше и реализуется с самого начала действия импульса напряжения. Эффективность экстракции по сравнению с термической генерацией усиливается.

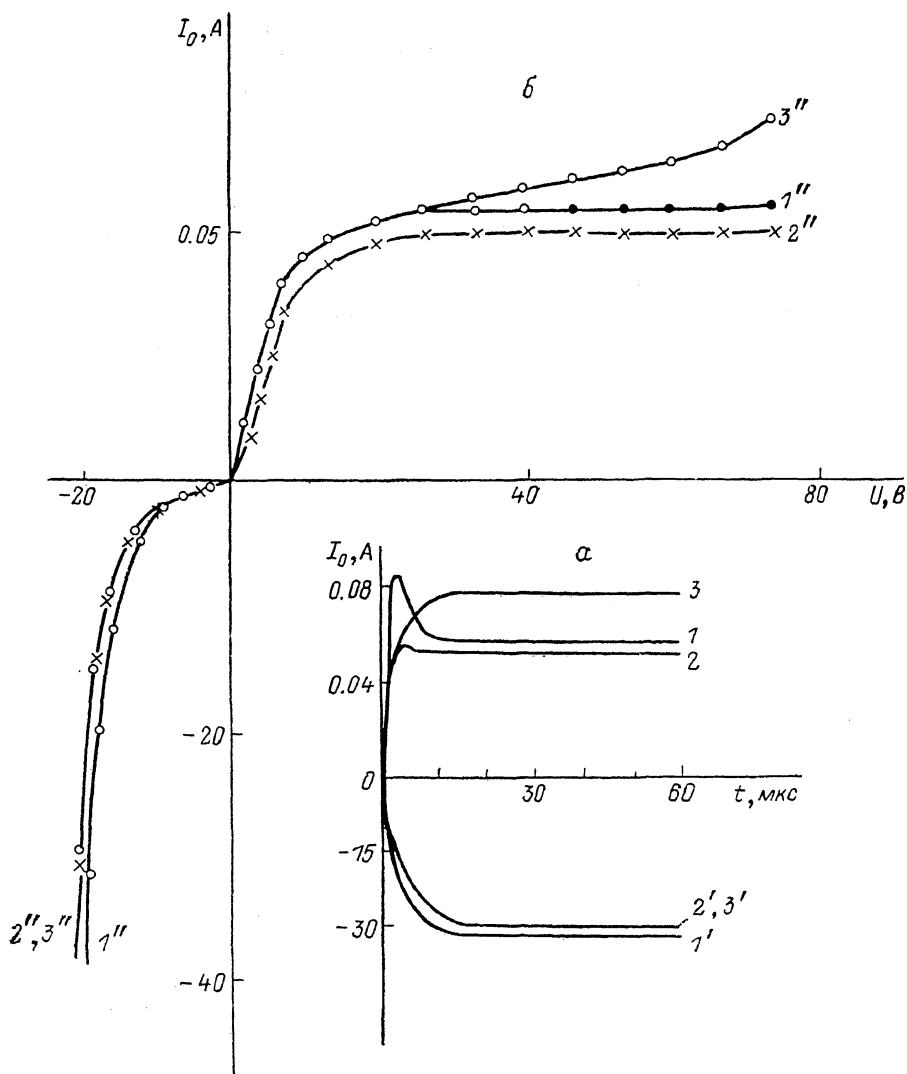


Рис. 2. Осциллограммы тока I (а) при $|U|=85$ В, стационарная ВАХ (б) в отсутствие внешнего разогрева (I , I' , I'') при внешнем разогреве поверхности с контактом меньшего диаметра (2, 2', 2'') и при разогреве поверхности с контактом большего диаметра (3, 3', 3'').

Удельное сопротивление материала диода 1.0 Ом·см, $d=20$ мкм.

Созданный таким же образом и той же величины разогрев большего контакта устранил пик тока (осциллограмма 3) и стабилизацию тока (кривая 3'' при $U > 0$). Подобные эффекты наблюдались на образцах германия и кремния [7].

Для одинаковых $|U|$ абсолютная величина отрицательных токов много больше, чем положительных. Соответственно в последнем случае много больше Джоулев разогрев. По этой причине внешние разогревы, существенно влияющие на положительные токи (осциллограммы 1-3), слабо влияют на отрицательные (осциллограммы 1'-3', кривые 1''-3'' при $U < 0$).

4. Сопоставляя полученные в настоящей работе результаты с данными [5-8], приходим к выводу, что основную роль в стабилизации тока играют неодно-

родный Джоулев разогрев и возникающая из-за этого экстракция b -дрейфом носителей заряда. Утверждая это, во избежание недоразумений отметим, что сказанное не означает отсутствия в диодах полевого разогрева носителей заряда и уменьшения тока за счет простого уменьшения подвижностей носителей заряда [1, 4]. Однако в реализовавшихся условиях эти эффекты не были определяющими.

Л и т е р а т у р а

- [1] Дмитриев В. В., Лысенко А. П., Мома Ю. А. // Электрон. тех. Сер. 2. Полупроводн. приборы. 1974. В. 6 (88). С. 38—41.
- [2] Вильф Ф. Ж., Лысенко А. П. // Патент США. Кл. НО1 5/02. N. Y., 1975. № 3660733.
- [3] Дмитриев В. В., Лысенко А. П., Мома Ю. А. // Электрон. тех. Сер. 2. Полупроводн. приборы. 1975. В. 7 (99). С. 3—14.
- [4] Дмитриев В. В., Михайлов Г. Б., Мома Ю. А. // Электрон. техн. Сер. 2. Полупроводн. приборы. 1974. В. 6 (88). С. 42—47.
- [5] Dobrovolskii V. N., Vinoslavskii M. N., Zinets O. S. // Phys. St. Sol. (a). 1973. v. 15. N 3. P. 711—720.
- [6] Добровольский В. Н., Павлюк С. П. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 2. С. 1377—1380.
- [7] Добровольский В. Н., Павлюк С. П., Романов А. В. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 2. С. 411—414.
- [8] Добровольский В. Н., Павлюк С. П. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 5. С. 972—974.
- [9] Карслоу Х. С. Теория теплопроводности. М., 1947. 360 с.

Киевский

государственный университет
им. Т. Г. Шевченко

Получена 23.07.1987

Принята к печати 2.09.1988

