

О ПРИРОДЕ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ  
АВТОЭМИССИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Б.В. С т е ц е н к о

Известно [1], что автоэлектронная эмиссия высокоомных полупроводников р-типа ( $Si, Ge$ ) чувствительна к свету. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) эмиссии при малых анодных напряжениях подчиняется закону Фаулера-Нордгейма и не зависит от освещения катода. Выше некоторой величины анодного напряжения автоэмиссионный ток слабо изменяется с напряжением, а падение напряжения на катоде начинает возрастать и достигает сотен вольт. В этой области ВАХ ток пропорционален освещенности катода. Светочувствительность объясняется разном генерируемых светом электронно-дырочных пар полем области пространственного заряда катода и выходом электронов из зоны проводимости в вакуум путем туннелирования через поверхностный потенциальный барьер, созданный внешним полем [2]. В экспериментальной работе [3] обнаружено, что автоэлектронная эмиссия кремниевых катодов с атомарно чистой поверхностью также чувствительна к свету. Однако ВАХ в этом случае подчиняется закону Фаулера-Нордгейма во всем диапазоне напряжений, а освещение катода приводит к параллельному смещению ВАХ в координатах логарифм тока - обратное напряжение в сторону больших токов. Падение же напряжения на катоде не превышает 5 В (в пределах точности измерительного прибора). Авторы работы [3] наблюдали новый вид светочувствительной автоэмиссии, принципиально отличающийся от описанного ранее.

Действительно, малая величина падения напряжения дает основание считать, что область пространственного заряда автоэммиттера равновесная (бестоковая). В этом случае представления, развитые в [2], не применимы, т.к. из них следует существование на ВАХ участках насыщения тока. Если же исходить из теории автоэлектронной эмиссии полупроводников с равновесной областью пространственного заряда [4], то можно показать, что из нее не следует параллельного смещения ВАХ при инжекции носителей светом по крайней мере в диапазоне малых световых потоков ( $10^{12}$ - $10^{13}$  квантов/с), применявшихся в экспериментах. Не отрицая представлений, развитых авторами работы [3], рассмотрим ранее не обсуждавшееся влияние на ток автоэлектронной эмиссии рекомбинации неравновесных носителей через поверхностные состояния (ПС). Как известно [6], на атомарночистых поверхностных концентрация ПС по порядку величины  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>. Поэтому даже при автоэмиссионных внешних полях практически весь экранирующий поле заряд сосредоточен на ПС, а уровень Ферми локализован вблизи середины запрещенной зоны полупроводника. При узкой ширине зоны ПС можно считать, что единичные электронные заряды сосредоточены в отдельных точках

в плоскости поверхности. Тогда внешнее поле проникает внутрь полупроводника через промежутки между зарядами, изгибая зоны вниз в области порядка расстояния между зарядами, если радиус экранирования значительно превосходит это расстояние. Таким образом, внутри полупроводника у поверхности имеется некоторый потенциальный рельеф с периодом, равным расстоянию между зарядами на ПС. Рекомбинация через ПС на эмиттирующей поверхности катода происходит в следующей последовательности. При захвате дырки ПС нейтрализуется заряд на единичном состоянии. В этом месте расширяется область проникновения внешнего поля внутрь полупроводника, что увеличивает изгиб зон. Если величина изгиба зон при этом такая, что вершина валентной зоны по энергии совпадает с состояниями вблизи дна зоны проводимости, то становится возможным туннелирование из валентной зоны в вакуум через эти состояния, что приведет к локальному возрастанию туннельного тока из-за уменьшения эффективной толщины барьера. Последующий захват на ПС электрона приведет к прекращению избыточного тока вследствие сужения области проникновения поля. Таким образом, процесс рекомбинации неравновесных электронно-дырочных пар приводит к возрастанию тока автоэлектронной эмиссии. При этом сохраняется зависимость тока от напряжения по Фаулеру-Нордгейму, что и позволяет качественно объяснить результаты экспериментов [3]. Для оценки величины изгиба зон аппроксимируем потенциал внутри полупроводника потенциалом заряженного круга, диаметр которого равен расстоянию между зарядами, а плотность заряда в нем в  $\epsilon$ -раз меньше средней плотности экранирующего заряда. Величина изгиба зон по этой оценке равна  $(E \cdot r / \epsilon)$ . Численные результаты для кремниевого эмиттера ( $\epsilon = 11.7$ ) приведены в таблице:

Внешнее поле	$E \cdot 10^{-7}$ (В/см)	1.0	3.0	5.0	7.0
Плотность заряда в ед. заряда электрона	$N \cdot 10^{-13}$ (см <sup>-2</sup> )	0.55	1.70	2.80	3.90
Расстояние между зарядами	$r$ (Å)	24	14	11	9.0
Изгиб зон	$U_0$ (В)	0.21	0.36	0.46	0.54

Из оценок следует, что внешнее поле, проникающее вглубь полупроводника между экранирующими зарядами на поверхностных состояниях, изгибает зоны на величины, сравнимые с шириной запрещенной зоны. При нейтрализации ПС дыркой изгиб зон удваивается из-за удвоения радиуса. Таким образом, вершина валентной зоны по энергии может попасть на уровни вблизи зоны проводимости, что подтверждает возможность количественного описания светочувствительности предлагаемой моделью.

Одним из следствий модели, которое может быть проверено экспериментально, является импульсный характер тока с площадки

на поверхности катода диаметром 20–100 Å, причем длительность импульса определяется временем захвата электрона поверхностным состоянием ( $10^{-7}$ – $10^{-8}$  с).

Отметим, что учет пространственной дискретности поверхностных состояний и проникновения поля в полупроводник, по-видимому, позволит объяснить наблюдаемые в автоэлектронной эмиссии полупроводников аномалии при адсорбции некоторых металлов [6].

Автор признателен за обсуждение работы и критические замечания А.А. Дадыкину, А.Ф. Яценко и П.Г. Борзяку.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] B o r z j a k P.G. et al. // Phys. Status. Solidi 1966. V. 14. N 2. P. 403–407.
- [2] Y a t s e n k o A.F. // Phys. Status. Solidi (a). 1970. V. 1. P. 333–348.
- [3] Б о р з я к П.Г., Д а д ы к и н А.А. // ДАН СССР. 1982. Т. 263, № 6. С. 1344–1346.
- [4] S t r a t t o n R. // Phys. Rev. 1962. V. 125. P. 67–84.
- [5] Н е с т е р е н к о Б.А., С н и т к о О.В. Физические свойства атомарночистой поверхности полупроводников. Киев: Наукова Думка, 1983. 410 с.
- [6] Б л а ж е н о в а Е.И., К а л г а н о в В.Д., М и л е ш к и н а Н.В. // ФТТ. 1983. Т. 25. В. 12. С. 3548–3553.

Институт физики  
АН УССР, Киев

Поступило в Редакцию  
28 июля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 21

12 ноября 1989 г.

05.2

#### ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА СУПЕРИОННОГО $Cu_{2-x}Se$ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВИБРАЦИИ

М.А. К о р ж у е в

Обнаружены эффекты изменения состава ( $x$ ) и электрофизических свойств суперионного проводника селенида меди  $Cu_{2-x}Se$  при вибрационном воздействии (ВВ) на образцы.

Суперионный проводник (СИП) селенид меди  $Cu_{2-x}Se$  представляет собой нестехиометрическое самолегирующееся полупроводниковое соединение, обладающее смешанной электронной ( $p$ -типа, по дыркам) и ионной (по меди) проводимостью [1].

Сплавы на основе  $Cu_{2-x}Se$  используются для изготовления среднетемпературных термоэлектрических преобразователей [1].