

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОДВИЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ДИЭЛЕКТРИКАХ В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Е. К. ЗАВАДОВСКАЯ

(Представлено научным семинаром по диэлектрикам ТПИ)

В связи с тем, что существуют различные точки зрения на зависимость подвижности электронов от напряженности поля в кристаллах, представляют интерес экспериментальные исследования подвижности электронов в полупроводниках и диэлектриках.

Имеющиеся экспериментальные данные по подвижности электронов в диэлектриках немногочисленны. Известны опыты В. И. Пружининой-Грановской [1] по изменению сопротивления слюды в магнитном поле и И. Е. Саржевского [2] по исследованию кварца в сильных электрических полях. По данным этих авторов, подвижность электронов не остается постоянной в высоких полях, а при некоторых условиях уменьшается с ростом напряженности поля по закону $\mu \sim \frac{1}{E}$ и $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$.

Для диэлектриков в сильных полях имеет место отступление от закона Ома. Оно выражается в постоянстве тока при изменении напряженности поля.

Н. П. Калабухов [3] наблюдал ток насыщения при фотопроводимости рентгенизованной NaCl. В его опытах постоянное значение фототока наступало при напряженности поля $\sim 10^3$ в/см и следовало за областью, в которой выполняется закон Ома.

Н. П. Калабухов объясняет ток насыщения тем, что вероятность захвата электронов атомами зависит от скорости движения электронов. В области тока насыщения электроны, по видимому, достигают той скорости, при которой вероятность их захвата атомами будет наибольшая. В этой области напряженности поля рассеяние электронов увеличивается, число их в общем потоке в направлении поля уменьшится и плотность тока сохраняет постоянное значение. Н. П. Калабухов наблюдал также ток насыщения при фотопроводимости окрашенных кристаллов KCl и KI.

Следует добавить к объяснению тока насыщения в диэлектриках, приведенному Н. П. Калабуховым, что с ростом напряженности поля может изменяться не только концентрация электронов, но и подвижность электронов. И что изменение подвижности электронов с напряженностью поля может оказаться более существенным в явлении тока насыщения.

Электрон при упругих столкновениях может передавать часть кинетической энергии ловушкам или узлам решетки, равную $\frac{2m}{M} W_k$. С увеличением скорости движения электрона величина передаваемой энергии увеличивается. Если скорость электронов принимает постоянное значение

в каком-то интервале напряженности поля, то, следовательно, подвижность электронов должна изменяться обратно пропорционально напряженности поля.

А. Хиппель [4] наблюдал насыщение фототока в окрашенных кристаллах КС1. Ток насыщения устанавливался при напряженности поля 600 *кв/см*. Наблюдение было проведено до напряженности поля 900 *кв/см*. При 920 *кв/см* произошел пробой образца. Измерение тока производилось при постоянной освещенности образца, а следовательно, и неизменной концентрации электронов в образце.

Таким образом, явление насыщения фототока в диэлектриках является фактом, указывающим на изменение подвижности электронов с напряженностью поля в диэлектриках.

Более подробно проведены исследования подвижности электронов в полупроводниках, в частности в германии.

Е. Д. Райдер [5] измерял подвижность электронов в германии типа *n* в интервале напряженностей поля до $2 \cdot 10^4$ *в/см*. В его опытах были приняты меры для уменьшения тепловых эффектов до минимума. Напряжение на образец подавалось в виде отдельных импульсов, длительностью 10^{-7} *сек*. Опыт показал, что для германия при комнатной температуре закон Ома действителен до полей $6 \cdot 10^2$ *в/см*. С увеличением поля наблюдается постоянство плотности тока $i = \mu e E = \text{const}$. Следовательно, если плотность тока сохраняет постоянное значение при росте напряженности поля, то должна уменьшаться или подвижность или концентрация электронов в германии с ростом поля. Однако в области напряженности поля, где плотность тока сохраняется постоянной, будет также иметь постоянное значение и скорость электронов ($v = 10^7$ *см/сек*). Это обстоятельство указывает на то, что уменьшается с напряженностью поля подвижность электронов.

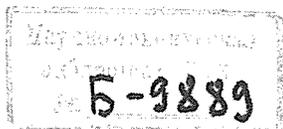
В области закона Ома подвижность электронов сохраняет постоянное значение. В более сильных полях, где плотность тока постоянная величина, подвижность электронов уменьшается с ростом напряженности поля по

$$\text{условию } \mu \sim \frac{1}{E}.$$

Известно экспериментальное исследование подвижности электронов в германии *n*, проведенное Е. М. Конуэллом и Е. Д. Райдером [6]. Они свои измерения производили при импульсной подаче напряжения. В этих опытах концентрация электронов сохранялась постоянной. Е. М. Конуэлл и Е. Д. Райдер наблюдали изменение подвижности электронов в германии с изменением напряженности поля.

По их экспериментальным данным следует, что подвижность электронов в слабых полях определяется рассеянием электронов примесями и пропорциональна кубу скорости электронов. Поэтому в области поля, где ток начинает расти сильнее, чем это следует по закону Ома, наблюдается сначала рост подвижности электронов. Затем, когда основным фактором, определяющим подвижность электронов, становится рассеяние электронов решеткой, тогда подвижность уменьшается с ростом поля по закону $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$. Такой характер изменения подвижности электронов с напряженностью поля экспериментально наблюдали в германии Е. М. Конуэлл и Е. Д. Райдер.

Е. Д. Райдер и В. Шокли [7] наблюдали отступление от закона Ома в германии при напряженности поля $E \sim 6 \cdot 10^2$ *в/см*. При этом значении напряженности поля и выше ток оставался постоянным. Концентрация электронов в их опытах сохранялась неизменной до напряженности поля $E \sim 2 \cdot 10^4$ *в/см*. В области закона Ома подвижность электронов оставалась



постоянной. В более сильных полях, где ток имеет постоянное значение, подвижность электронов изменяется по условию $\mu \sim \frac{1}{E}$.

Е. Д. Райдер и В. Шокли дают теоретическое объяснение полученных результатов. Они показывают, что напряженность поля, при которой наблюдается отступление от закона Ома, определяется столкновениями электронов с колебаниями решетки. Если потери энергии электронов обусловлены упругими колебаниями, то граничная напряженность поля

соответствует приблизительно $\frac{V_{3\theta}}{u_0} = 150$ в/см, где $V_{3\theta}$ — скорость про-

должных звуковых волн, u_0 — подвижность при небольших полях. Если преобладают потери энергии, обусловленные оптическими колебаниями узлов решетки, то граничная напряженность поля будет выше. Скорость

сноса при граничной напряженности поля определяется условием $\left(\frac{h\nu}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$

и принимает постоянное значение, численно равное $\sim 10^7$ см/сек. Эта величина скорости хорошо подтверждается на опыте для германия.

Таким образом, подробные исследования германия показали, что для полупроводников наблюдается на опыте уменьшение подвижности электронов с ростом поля, которое может происходить по закону $\mu \sim \frac{1}{E}$

или $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$.

Приведенные экспериментальные и теоретические данные по подвижности электронов в полупроводниках и диэлектриках позволяют установить две области зависимости подвижности электронов от напряженности поля. В первой области, соответствующей закону Ома, подвижность электронов сохраняет постоянное значение при росте напряженности поля. Во второй области подвижность электронов с ростом напряженности поля уменьшается. Уменьшение подвижности электронов происходит или по

закону $\mu \sim \frac{1}{E}$ или $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$. Например, для полупроводника германия

граничной напряженностью поля является $E = 6 \cdot 10^5$ в/см. Для слюды подвижность электронов остается постоянной до $3 \cdot 10^5$ в/см и от $E = 3 \cdot 10^5$ в/см до 10^6 в/см наблюдается уменьшение подвижности электронов.

Результаты теоретических [8] и экспериментальных исследований подвижности электронов в полупроводниках и диэлектриках можно кратко представить в виде таблицы. В таблице 1 дается зависимость подвижности электронов от напряженности поля, полученная различными авторами для некоторых полупроводников и диэлектриков.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований полупроводников в общем приводят к уменьшению подвижности электронов с напряженностью поля. Исключение составляют полупроводники с ионной структурой по данным Давыдова и Шмушкевича, которые показывают, что подвижность электронов в таких кристаллах должна расти с напряженностью поля.

Для диэлектриков нам неизвестны теоретические работы по изучению подвижности электронов. Экспериментальные работы по исследованию подвижности электронов в диэлектриках немногочисленны. Они показывают, что подвижность электронов в диэлектриках уменьшается с напряженно-

Таблица 1

Зависимость подвижности электронов в полупроводниках и диэлектриках от напряженности поля

Авторы	Материалы	Область исследования	Характер зависимости подвижности электронов
1. Б. И. Давыдов, Е. М. Шмушкевич. (1940 г.)	Полупроводники с атомарной решеткой	Слабые поля Сильные поля	Подвижность постоянная Подвижность уменьшается $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$
2. Б. И. Давыдов и Е. М. Шмушкевич (1940 г.)	Полупроводники с ионной решеткой	Слабые поля Сильные поля	Подвижность постоянная Подвижность растет с полем
3. Н. Л. Писаренко (1938 г.)	Полупроводники с атомарной решеткой	Сильные поля	Подвижность уменьшается $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$
4. Л. Ландау и А. Компанец (1935 г.)	Полупроводники	Сильные поля	Подвижность уменьшается $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$
5. Е. М. Конуэлл и Е. Д. Райдер	Полупроводник германий	За пределом закона Ома	Подвижность растет, затем уменьшается $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$
6. В. Шокли (1951 г.)	Полупроводник		Подвижность уменьшается $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$
7. Е. Д. Райдер (1951 г.)	Полупроводник германий	а) до $6 \cdot 10^2$ в/см в области з. Ома б) от $6 \cdot 10^2$ в/см за пределами закона Ома.	Подвижность постоянная Подвижность уменьшается $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$
8. Е. М. Конуэлл (1952 г.)	Полупроводник германий		В высоких полях подвижность изменяется.
9. А. Ф. Иоффе (1939 г.)	Полупроводник Si_2O	До $5 \cdot 10^4$ в/см	Подвижность постоянная
10. В. И. Пружинина-Грановская (1940 г.)	Диэлектрик слюда	От $1 \cdot 10^5$ в/см — $3 \cdot 10^5$ в/см От $3 \cdot 10^5$ в/см — $5 \cdot 10^5$ в/см	Подвижность уменьшается Подвижность растет
11. П. Е. Саржевский (1950 г.)	Диэлектрик кварц	До $3 \cdot 10^5$ в/см	Подвижность уменьшается
12. А. А. Воробьев, Е. К. Завадовская (1951 г.)	Кристаллы щелочно-галонидных солей	В сильных полях	Подвижность уменьшается $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$ $\mu \sim \frac{1}{E}$

стью поля. Эти данные подтверждают высказанную нами точку зрения, что подвижность электронов в диэлектриках должна уменьшаться с ростом напряженности поля в области сильных полей по закону $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$

и $\mu \sim \frac{1}{E}$ [9].

Выражаю благодарность профессору А. А. Воробьеву за полезную дискуссию поставленных вопросов.

ЛИТЕРАТУРА

1. П р у ж и н и н а - Г р а н о в с к а я В. И. Изменение сопротивления диэлектриков в магнитном поле (слюда). ЖЭТФ, 10, 8, 878, 1940.
2. С а р ж е в с к и й П. Е. Электропроводность кварца в сильных электрических полях. Автореферат, 1950.
3. К а л а б у х о в Н. П. Вторичные явления в фотопроводящих кристаллах щелочно-галогенидных солей и роль кристаллических дефектов в этих явлениях. Автореферат, 1952.
4. H i r p e l A. Electronic Conduction in Insulating Crystals under very High Field Strength. Phys. Rev. 54, 1096, 1938.
5. R y d e r E. I. Mobility of Electrons in High Electric Field. Phys. Rev. 82, 2, 330, 1951.
6. C o n w e l l E. M. and R y d e r E. I. High Field Mobility of Electrons in Germanium with Impurity Scattering Dominant. Phys. Rev. 87, 1, 190, 1952.
7. R y d e r E. I. and S h o k l y W. Mobility of Electrons in High Electric Fields. Phys. Rev. 81, 1, 9, 139, 1951.
8. З а в а д о в с к а я Е. К. Электрический пробой и подвижность электронов в диэлектриках и полупроводниках. Известия Томского политехнического института. 82, 1956.
9. З а в а д о в с к а я Е. К. О соотношении между пробивной прочностью и подвижностью зарядов в диэлектрике. ДАН LXXXII, 4, 595, 1952.