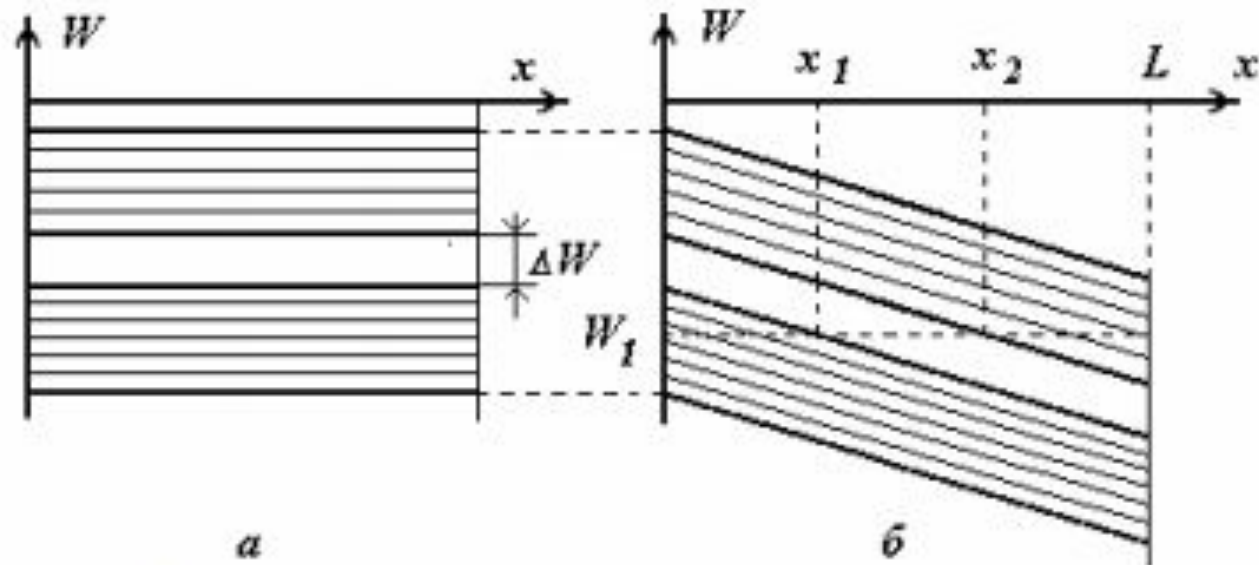


# «Теория безэлектродного пробоя Зинера»

- Согласно теории Зинера в сильном электрическом поле энергетические зоны в кристалле претерпевают изменения, как показано на рис. 3.1.
- В соответствии с этим Зинер предположил, что в сильном электрическом поле электроны туннелируют («просачиваются» сквозь потенциальный барьер) из валентной зоны диэлектрика в зону проводимости



**Рис. 3.1. Зонная структура кристалла:**  
 а) без поля; б) при наложении поля

- Потенциальная энергия электрона в поле напряженностью  $E$  равна  $eEx$ , где  $e$  – заряд электрона, а  $x$  – координата в направлении поля  $E$ . Полная потенциальная энергия электрона в кристалле при наличии поля равна:

$$W = V(x) - eEx,$$

где  $V(x)$  – потенциальная энергия электрона при  $E = 0$ .

Тогда уравнение Шредингера будет иметь вид

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \cdot \frac{d^2 \psi}{dx^2} + [V(x) - eEx - W_0] \cdot \psi = 0,$$

что соответствует дискретным значениям полной энергии  $W$ :

$$W = eEx + W_0 + \alpha + 2\beta \cdot \text{Cos} \frac{2\pi}{N} \cdot j$$

и энергетической диаграмме наклоненных зон. Причем наклон энергетических зон будет увеличиваться с ростом  $E$ .

В этом случае электрон с энергией  $W_1$  может находиться на участках  $0 - x_1$  и  $x_2 - L$ , т.е. при наличии поля  $E$  может наблюдаться просачивание электронов из валентной зоны в зону проводимости без затрат энергии вдоль прямой  $x_1 - x_2$ . Вероятность такого перехода равна вероятности туннельного эффекта

За счет увеличения вероятности туннельного эффекта, т.е. просачивания электронов из валентной зоны в зону проводимости электронный ток достигает больших значений, что в конечном итоге приводит к пробоем за счет электростатической ионизации.



Если принять, что плотность электронного тока

$$j_{\text{э}} = ne v_{\text{др}}, \text{ где } v_{\text{др}} = \mu \cdot E, \text{ а } n = \sqrt{\frac{NP}{A}}, \quad (3.7)$$

тогда, подставляя значение  $P$ , получим

$$j = neE\mu = \sqrt{\frac{eNa}{A\hbar}} \cdot e \cdot \mu \cdot E^{3/2} \cdot e^{-\left(\frac{\pi^2 ma \Delta W^2}{2e\hbar^2 E}\right)^{1/2}}. \quad (3.8)$$

Здесь  $N$  – число электронов в валентной зоне в  $1 \text{ см}^3$ ;

$A$  – вероятность рекомбинации в единицу времени.

Полученная формула дает сильное возрастание тока с ростом напряженности поля, но не дает четкого критерия пробоя. Согласно теории Зинера пробой наступает тогда, когда вероятность туннельного эффекта (просачивания электронов) возрастает в 100 и более раз с ростом значения  $E$  на  $10 \div 15 \%$ .

Такое соотношение наблюдается при  $\Delta W = 1$  эВ,  $a = 3 \cdot 10^{-8}$  см и при изменении  $E$  от  $1 \cdot 10^8$  до  $1.13 \cdot 10^8$  В/м, что, по мнению Зинера, согласуется с данными эксперимента. Однако такой критерий пробоя произволен и не имеет убедительного физического обоснования. Указанное Зинером соотношение может иметь место и при других напряженностях поля, например при изменении  $E$  от  $0.1 \cdot 10^8$  до  $0.11 \cdot 10^8$  В/м.

Правильнее было бы на основании этой теории определить электрическую прочность как напряженность поля, при которой электронный ток разрушает твердый диэлектрик. Поэтому представляет интерес, какие плотности тока обеспечивают просочившиеся электроны при напряженностях поля, при которых происходит пробой на опыте.



Экспериментально установлено, что для разрушения кристалла  $NaCl$  необходима плотность электронного тока порядка  $10^4$  А/см<sup>2</sup>. Поэтому из приведенных данных можно сделать заключение о том, что туннелирование электронов из валентной зоны диэлектрика в полях, при которых наблюдается пробой, обеспечивает очень малые плотности тока. Иными словами, туннелирование электронов из валентной зоны не может обусловить ЭПТД.

Однако этот механизм может наблюдаться при пробое полупроводников, у которых  $\Delta W$  не более 2 эВ. Наряду с этим он может обеспечить переход электронов с уровней захвата (из ловушек) в зону проводимости диэлектрика, которые затем могут принять участие в пробое.





**Спасибо за внимание!**